

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL OLEAJE Y DE LA
RESUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS EN EL LITORAL
DE BARCELONA**

Autor/a

JUAN ALBERTO DELGADO MUÑOZ

Tutor/a

**MANUEL ESPINO INFANTES
VICENÇ GRÀCIA GARCIA
JESÚS GÓMEZ AGUAR (TUTOR EXTERN)**

Departament

ENGINYERIA HIDRÀULICA, MARÍTIMA I AMBIENTAL

Intensificació

ENGINYERIA MARÍTIMA

Data

OCTUBRE DE 2013

RESUMEN: Estudio experimental del oleaje y de la resuspensión de sedimentos en el litoral de Barcelona.

Autor: Juan Alberto Delgado Muñoz

**Tutores: Manuel Espino Infantes
Vicenç Gràcia Garcia**

Tutor externo: Jesús Gómez Aguar

La presencia de partículas suspendidas en el agua del mar tiene diferentes efectos negativos sobre los ecosistemas presentes en las zonas donde esta se produce. Además, influye también negativamente en las actividades económicas relacionadas con el turismo. Por ello, es necesario estudiar las condiciones bajo las que se reproduce dicho fenómeno.

Campañas previas de medidas realizadas en el litoral de Barcelona indican que el principal agente causante de la resuspensión de sedimentos en esta zona es el oleaje, seguido en algunas ocasiones de las corrientes. En este sentido, y aprovechando los datos registrados durante una campaña de medidas realizada durante Marzo-Abril de 2011, disponiendo así de un gran número de medidas de oleaje, corrientes y sedimento en suspensión, se propone estudiar bajo qué condiciones hidrodinámicas y meteorológicas se producen las mayores resuspensiones de partículas en la zona, así como caracterizar los flujos de sedimento asociados.

Esta campaña de medidas se reparte en tres puntos del litoral de Barcelona. Estos puntos de estudio, denominados A1, A2 y A3, se encuentran situados frente al colector de Bogatell, frente a la desembocadura del río Besòs y frente al puerto deportivo del Fòrum, respectivamente. Además, se dispone también de datos meteorológicos y oceanográficos registrados por los instrumentos de la XIOM en las localizaciones de Pont del Petroli (Badalona) y Llobregat.

En este estudio se procederá, en primer lugar, a realizar un control de calidad de los datos recopilados. Posteriormente, tras aplicar algunas transformaciones sobre los mismos, se analizarán cualitativamente con el objetivo de caracterizar el oleaje y las corrientes que tienen lugar en el litoral de Barcelona. Seguidamente, se identificarán los principales factores responsables de la resuspensión de sedimentos en la zona y se establecerán las correlaciones correspondientes. Finalmente, se describirán de forma conjunta los procesos hidrodinámicos y meteorológicos que tuvieron lugar durante la campaña, caracterizando los flujos de sedimento que se producen tras las resuspensiones.

Las principales conclusiones de este estudio certifican las observaciones pasadas, definiendo el oleaje como principal agente responsable de la resuspensión de sedimentos, siendo las corrientes un factor secundario. También se observa el efecto que las descargas continentales tienen sobre las concentraciones de sedimento en suspensión.

ABSTRACT: Experimental study of waves and sediment resuspension on Barcelona's nearshore.

Author: Juan Alberto Delgado Muñoz

Tutors: Manuel Espino Infante

Vicenç Gràcia Garcia

External Tutor: Jesús Gómez Aguar

Presence of suspended particles in seawater has several negative effects on the ecosystems of the areas where it appears. In addition, it has negative influence on economic activities related to tourism. Therefore, it is necessary to study the conditions that lead to the appearance of this phenomenon.

Previous campaigns of measurements taken place on Barcelona's nearshore reveal that the main generative agents of sediment resuspension in this area are waves, followed sometimes by current flows. In this sense, and taking advantage of the data recorded during a measurement campaign conducted during March-April of 2011 and establishing a large number of wave, current flow and suspended sediment measurements, it is proposed to study under which hydrodynamic and meteorological conditions are largest particle resuspensions created in the area, characterizing as well the sediment flow produced.

This measurement campaign is divided into three different points of Barcelona's nearshore. These points of study, called A1, A2 and A3, are located in front of Bogatell's collector, opposite of Besòs river mouth and in front of the Forum marina, respectively. In addition, meteorological and oceanographic data are provided by XIOM instruments at the locations of Pont del Petroli (Badalona) and Llobregat.

In this study, firstly, a quality control of the collected data will be performed. Later, after applying some transformations on them, a qualitative analysis will be done in order to characterize Barcelona's nearshore waves and current flows. Then, main factors responsible for sediment resuspensions in the area will be identified, establishing relevant correlations. Finally, hydrodynamic and meteorological processes that took place during the campaign will be described, characterizing sediment flows induced by resuspensions.

Main findings of this study prove past observations, defining waves as the main agent responsible for sediment resuspensions, being current flows a secondary factor. Effects of continental discharges on suspended sediment concentrations have been observed as well.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer sobre todo a mis tutores Manuel Espino y Vicenç Gràcia la dedicación, atención y paciencia que han tenido conmigo a lo largo de estos últimos meses. La realización de esta tesina no hubiera sido posible sin su ayuda, orientación y consejos. También agradecer a Jesús Gómez las facilidades dadas a la hora de recopilar todos los datos que se han analizado en este estudio.

Por otro lado, me gustaría dar también las gracias a mis padres y a mi hermana por el apoyo moral recibido, no sólo durante estos meses, sino a lo largo de toda la carrera, estando siempre presentes tanto en los buenos como en los malos momentos.

A Haizea en especial, agradecer su comprensión y sus ánimos cuando se me hacía todo cuesta arriba, dándome el impulso moral necesario para continuar hacia adelante.

Por último, agradecer también a mis amigos los momentos que han servido para desconectar un poco la mente y, a su vez, pedirles disculpas por aquellos momentos en los que no he estado disponible por estar centrado en la redacción de esta tesina.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ÁREA DE ESTUDIO	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. LOCALIZACIÓN	7
2.3. EL LITORAL CATALÁN	8
2.3.1. MORFOLOGÍA	8
2.3.2. OCEANOGRAFÍA	10
2.3.2.1. Corrientes	10
2.3.2.2. Oleaje	12
2.3.2.3. Mareas	13
2.3.3. CLIMATOLOGÍA	14
2.3.3.1. Vientos	15
2.3.4. HIDROGRAFÍA	16
2.3.4.1. El río Llobregat	16
2.3.4.2. El río Besòs	17
2.3.4.3. Colectores y emisarios	18
2.3.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	19
3. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA	20
3.1. INTRODUCCIÓN	20
3.2. LOCALIZACIÓN	20
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES	22
3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS	24
3.4.1. AWAC	24
3.4.2. RDI WH300	26
3.4.3. NORTEK AQUADOPP	27
3.4.4. BOYA AANDERAA 4700	28
3.4.5. BOYAS DATAWELL DIRECTIONAL G7 Y DATAWELL WAVERIDER	29

3.4.6. BASIC WEATHER STATION BWS200 SERIES	30
3.4.7. OBS T8280	30
3.4.8. AQUATEC AQUALOGGER 201TY	31
4. PROCESADO Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS	32
4.1. INTRODUCCIÓN	32
4.2. GENERALIDADES	32
4.3. CORRIENTES	34
4.3.1. ESTACIONES A1 Y A2	34
4.3.2. ESTACIÓN A3	40
4.3.3. ESTACIÓN BADALONA	43
4.3.4. ESTACIÓN LLOBREGAT	45
4.4. OLEAJE	47
4.4.1. ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA (H_s)	48
4.4.2. ALTURA MÁXIMA DE OLA (H_{max})	50
4.4.3. PERÍODO DE PICO (T_p)	52
4.4.4. DIRECCIÓN DEL OLEAJE ($DirTp$)	55
4.5. TURBIDEZ	57
4.5.1. TURBIDÍMETROS	58
4.5.2. SENSORES ÓPTICOS DE RETRODISPERSIÓN (OBS)	59
4.6. METEOROLOGÍA	64
4.6.1. ESTACIÓN BADALONA	64
4.6.2. ESTACIÓN LLOBREGAT	66
4.7. DESCARGAS CONTINENTALES	67
5. ANÁLISIS DE LOS DATOS	68
5.1. INTRODUCCIÓN	68
5.2. CORRIENTES	68
5.2.1. ESTACIÓN A1	68
5.2.2. ESTACIÓN A2	73
5.2.3. ESTACIÓN A3	78
5.2.4. ESTACIÓN BADALONA	83
5.2.5. ESTACIÓN LLOBREGAT	85

5.2.6. SÍNTESIS	89
5.3. OLEAJE.....	89
5.3.1. ESTACIÓN A1	89
5.3.2. ESTACIÓN A2.....	90
5.3.3. ESTACIÓN A3	91
5.3.4. ESTACIÓN BADALONA.....	92
5.3.5. ESTACIÓN LLOBREGAT	92
5.3.6. SÍNTESIS	93
5.4. TURBIDEZ	94
5.4.1. ESTACIÓN A1	94
5.4.2. ESTACIÓN A2	95
5.4.3. SÍNTESIS	97
5.5. METEOROLOGÍA.....	100
5.5.1. ESTACIÓN BADALONA.....	100
5.5.2. ESTACIÓN LLOBREGAT	102
5.5.3. SÍNTESIS	103
5.6. DESCARGAS CONTINENTALES	104
 6. ANÁLISIS DE LA RESUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS	 105
6.1. INTRODUCCIÓN.....	105
6.2. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO	105
6.2.1. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO ASOCIADAS A LA CORRIENTE	106
6.2.2. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO ASOCIADAS AL OLEAJE.....	107
6.2.3. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO COMBINADAS	108
6.2.4. TENSIÓN DE CORTE CRÍTICA.....	108
6.3. RESULTADOS.....	110
6.3.1. ESTACIÓN A1	110
6.3.2. ESTACIÓN A2.....	112
6.3.3. ESTACIÓN A3	113
6.3.4. ESTACIÓN BADALONA.....	114
6.3.5. ESTACIÓN LLOBREGAT	116
6.4. COMPARATIVA.....	118

7. DISCUSIÓN	122
7.1. INTRODUCCIÓN	122
7.2. ESCENARIOS.....	123
7.2.1. PERÍODO DEL 12 AL 20 DE MARZO	123
7.2.2. PERÍODO DEL 20 AL 28 DE MARZO	126
7.2.3. PERÍODO DEL 28 DE MARZO AL 9 DE ABRIL	129
7.2.4. PERÍODO DEL 9 AL 18 DE ABRIL.....	132
 8. CONCLUSIONES	135
 9. BIBLIOGRAFÍA.....	136

1. INTRODUCCIÓN

El litoral es un sistema dinámico que se encuentra en constante transformación. Caracterizado por una morfología, una distribución de sedimentos y la presencia de ecosistemas biológicos propios, tienen lugar en él procesos relacionados con el oleaje, el viento, las mareas, las corrientes litorales y la influencia del continente a través de las descargas fluviales.

Una de sus principales características es también la concentración de población asentada en sus proximidades, dando lugar a importantes actividades económicas a través de puertos comerciales y, cómo no, del turismo. Por ello, durante las últimas décadas se está llevando a cabo un gran esfuerzo investigador en la zona costera.

Dentro de la gran cantidad de campos en los que la investigación ha intentado comprender y cuantificar los procesos y factores que intervienen en el desarrollo y la evolución costera, con el fin de aumentar la capacidad de dar respuestas a problemas reales, se encuentra el estudio de la calidad del agua y de los sedimentos, siendo el tema que se tratará en las siguientes páginas.

Las partículas suspendidas en el agua del mar provocan, como principal consecuencia, la disminución de la calidad lumínica, hecho que genera un efecto negativo en el proceso de fotosíntesis de las algas y otras plantas marinas. Dicho de otro modo, su efecto disminuye la concentración de oxígeno y, a su vez, tiene un efecto indirecto en la alimentación de los peces. Además, la turbidez tiene también un efecto negativo en cuanto a términos estéticos, ya que las playas con agua turbia no son muy bien consideradas por los visitantes, influyendo directamente en el turismo de la zona. Por último, también cabe destacar la gran cantidad de contaminantes que se adhieren a los sedimentos marinos, especialmente a aquellos que se consideran cohesivos.

Para llevar a cabo el estudio se aprovechará una campaña de toma de datos realizada en Marzo-Abril de 2011 dentro del marco del proyecto FIELD_AC, en el cual participa el Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya y que tiene, entre otros objetivos, establecer mejoras en el campo operacional hidrodinámico y morfodinámico del tramo de costa seleccionado.

Los objetivos principales de este estudio son, en líneas generales e intentando seguir el mismo orden que en el desarrollo del mismo, caracterizar el oleaje y las corrientes que se producen en la zona litoral de Barcelona, determinar cuáles son los principales agentes impulsores y bajo qué condiciones meteorológicas generan la resuspensión de sedimentos y, por último, conocer qué flujos de sedimento asociados a este fenómeno tienen lugar en este tramo de costa.

Para ello, se ha decidido estructurar el contenido de esta tesina en los siete capítulos que siguen a continuación.

Para entrar en situación, en el segundo capítulo se describen las principales características morfológicas, oceanográficas, climatológicas e hidrográficas de la zona de estudio, así como una introducción al transporte de sedimentos que se produce en la misma.

En el tercer capítulo se muestra la posición de los puntos de estudio en los cuales los instrumentos de medida fueron instalados, incluyendo también una breve descripción de los mismos.

En los capítulos cuarto y quinto se presentan y analizan cualitativamente el conjunto de los datos recopilados, realizando primero un control de calidad de los mismos para posteriormente, tras aplicar algunas transformaciones sobre ellos, sacar las primeras conclusiones del estudio.

El sexto capítulo consta de una descripción de los cálculos que nos permiten, tras su aplicación, analizar los factores que producen la resuspensión de sedimentos en la zona.

En el capítulo séptimo se realiza una síntesis de la información recopilada hasta este punto, con el fin de describir los procesos hidrodinámicos que tuvieron lugar durante la campaña y establecer su correlación con las concentraciones de sedimentos en suspensión que se produjeron en la zona.

Finalmente, en el octavo capítulo se establecen las conclusiones principales a las que el presente estudio ha permitido llegar.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. INTRODUCCIÓN

En este primer apartado se presentan los aspectos más significativos y relevantes de la zona de estudio, centrando la atención en la descripción de sus características morfológicas, oceanográficas, climatológicas e hidrográficas. También se introducen las características más importantes relacionadas con el transporte de sedimentos en la zona.

2.2. LOCALIZACIÓN

El estudio se ha llevado a cabo en la zona central de la costa catalana. Concretamente, los datos utilizados para su desarrollo se localizan en la zona costera de los municipios de El Prat de Llobregat, Barcelona, Sant Adrià de Besòs y Badalona, en la provincia de Barcelona, desde la desembocadura del río Llobregat hasta el Pont del Petroli. La Fig. 1 muestra la situación geográfica de los municipios que forman parte del Área Metropolitana de Barcelona (AMB), en cuya zona costera se ha realizado el estudio.

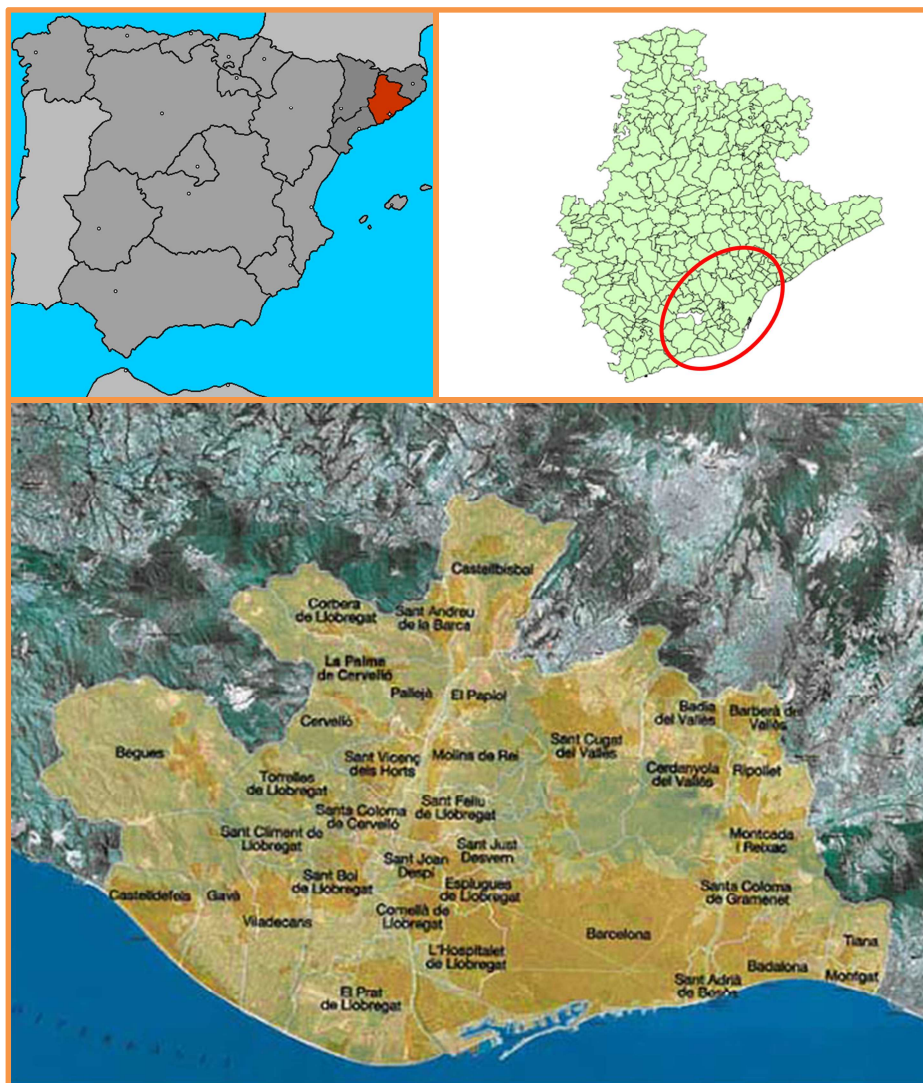


Fig. 1. Situación geográfica de la zona de estudio.

2.3. EL LITORAL CATALÁN

Situada en el Noroeste del mar Mediterráneo, la costa catalana es una de las regiones más ricas y más rápidamente desarrolladas de España. Su línea de costa se extiende a lo largo de 826.5 kilómetros entre el cabo Falcó, situado en la provincia de Girona, y el río Sénia, situado en la provincia de Tarragona [ACA, 2012]. En ella se encuentran ubicados un total de 70 municipios que, ocupando tan sólo un 7% de la superficie de Catalunya, albergan un 44% de su población, incrementándose ésta significativamente en los períodos vacacionales [Brenner et al., 2006].

2.3.1. MORFOLOGÍA

Debido a su estructura geológica, la costa catalana presenta una orografía y morfología muy variadas, dando lugar a diferentes tipos de costa. De esta manera, encontramos configuraciones que se pueden clasificar en seis tipos principales de costa, los cuales se acompañan con algunos ejemplos a continuación:

1. Costa rocosa y abrupta (cabo de Creus, Montgrí, Begur, Tossa de Mar).
2. Costa rocosa medianamente abrupta y con pocas posibilidades de desarrollar playas (Garraf, cabo de Salou).
3. Costa poco abrupta y poco recortada (zona central del Maresme, Vilanova i la Geltrú, l'Ametlla de Mar).
4. Costa deltaica progradante y deltas potencialmente progradantes (desembocadura de la Tordera, delta del Ebro).
5. Costa deltaica aluvial con fuerte presión dinámica del litoral y presencia de algún afloramiento rocoso (bahía de Roses).
6. Sectores altamente influenciados o modificados por la acción humana, con importantes variaciones del perfil litoral original (fachada litoral de Barcelona y Tarragona) [ACA, 2012].

El caso que nos ocupa se corresponde sin duda alguna con el último tipo de costa mencionado, ya que se trata de una zona litoral metropolitana. Además, nuestra área de estudio incluye también la zona deltaica de la desembocadura del río Llobregat, espacio de gran importancia ambiental que se encuentra actualmente amenazado por la alta actividad humana en la zona.

Pasando ya a la descripción morfológica *offshore*, el tramo de costa estudiado se encuentra situado en el Mediterráneo Noroccidental, subdivisión del mar Mediterráneo formada por el mar de Liguria, el golfo de León y el mar Balear (también conocido como mar Catalán), siendo este último cuerpo de agua el que contiene el tramo de costa objeto de estudio (Fig. 2).

La subcuenca que contiene el mar Balear consiste en un gran valle submarino de unos 400 kilómetros de largo y 1.800 metros de desnivel. El eje de este valle presenta una orientación que va de Suroeste a Noreste, desde el canal de Ibiza, situado a 700 metros

de profundidad, hasta la llanura abisal, que se encuentra a unos 2500 metros de profundidad (Fig. 3).



Fig. 2. Situación geográfica del mar Balear.



Fig. 3. Relieve submarino del mar Balear.

La plataforma continental del mar Balear se sitúa entre los 0 y los 200 metros de profundidad, con una inclinación general que no alcanza los 1.5 grados. La anchura de esta plataforma es muy variable, por lo que se encuentran extensiones que van desde los 5 kilómetros en la costa Norte de Mallorca, hasta los 70 kilómetros que alcanza en la plataforma continental del Ebro frente al municipio de Vinaròs. Puntualmente, en algunas zonas cercanas a cañones submarinos, la plataforma puede llegar a reducirse hasta alcanzar sólo 3 kilómetros de espesor [Canals et al., 2007]. El talud continental del

mar Balear presenta generalmente pendientes de 4 o 5 grados, aunque puede llegar a valores máximos de 11 grados, como es el caso de Menorca.

Otra característica morfológica importante del mar Balear es que su plataforma y su talud continental presentan discontinuidades provocadas por diversos cañones submarinos, lo que origina una configuración muy irregular de su relieve. Muchos de estos cañones acaban formando canales submarinos a medida que se abren paso hacia los fondos abisales. Entre ellos, destacan dos fuertes intersecciones debido a la presencia de los cañones submarinos de Palamós y Blanes.

Aproximándonos más a la zona de estudio, la plataforma continental de Barcelona presenta anchuras que van desde los 6 hasta los 20 kilómetros y su pendiente media es de 0.6 grados. No obstante, esta pendiente alcanza los 21 grados tanto en la desembocadura del río Llobregat como en los bordes de algunos bancos de arena de tamaño significativo situados al Norte del río Besòs [Canals et al., 2007]. Este tramo de plataforma continental se puede dividir en 3 zonas debido a los cambios bruscos de pendiente que experimenta en las isóbatas 30-40 metros y 80 metros. En cuanto al talud continental, presenta pendientes de 3-4 grados durante sus 10 kilómetros de anchura [ITGE, 1988].

La plataforma continental de Barcelona se sitúa entre el cañón submarino de Foix en el Sur ($41^{\circ}8'N$) y el cañón de Blanes en el Norte ($41^{\circ}32'N$) [Canals et al., 2007]. A lo largo de la misma, ordenados de Sur a Norte, se suceden los cañones submarinos de Berenguera, Morràs, Can Pallissó, Besòs y Arenys (Fig. 5).

2.3.2. OCEANOGRAFÍA

2.3.2.1. CORRIENTES

La principal característica de la circulación marina en el Mediterráneo Noroccidental es la presencia de una corriente intensa que bordea la irregular plataforma, dejando la costa a la derecha, desde el mar de Liguria hasta el mar Balear. Esta corriente es conocida como Corriente del Norte, aunque también es denominada en ocasiones como Corriente Liguro-Provenzal o Corriente Catalana.

Se trata de una corriente de origen termohalino y forma parte de la circulación general ciclónica del Mediterráneo. Su origen se debe a la unión de las ramas Este y Oeste de la Corriente de Córcega, tiene una anchura de 30 a 50 kilómetros y alcanza profundidades de 300-400 metros. Las velocidades máximas, del orden de 30-50 cm/s, se dan en la capa superficial y en el centro de la corriente [Rubio, 2006].

Tras atravesar la zona del golfo de León, la Corriente del Norte penetra en el mar Balear, donde sigue en equilibrio geostrófico con el frente de talud, que en esta zona se denomina Frente Catalán. En superficie este frente se separa de la costa entre 28 y 55 kilómetros y su base intersecta el talud a una profundidad de 400 metros [Font et al., 1990]. Al entrar en el mar Balear, la Corriente del Norte transporta en superficie las aguas relativamente más frías y menos salinas del golfo de León.

Aguas abajo, la Corriente del Norte fluye siguiendo el talud en dirección Suroeste hasta llegar al Norte del canal de Ibiza (39°N). En este punto la corriente se bifurca, de modo que la rama principal continua hacia el Suroeste, llevando aguas relativamente más frías y salinas hacia la cuenca Algeriana, mientras que una rama secundaria gira en sentido ciclónico y vuelve hacia el Noreste, formando la Corriente Balear, que se puede ver representada en el trazo discontinuo del esquema de la Fig. 4. También se representa la trayectoria que sigue la Corriente del Norte, así como los cañones submarinos más importantes y los vientos predominantes del golfo de León.

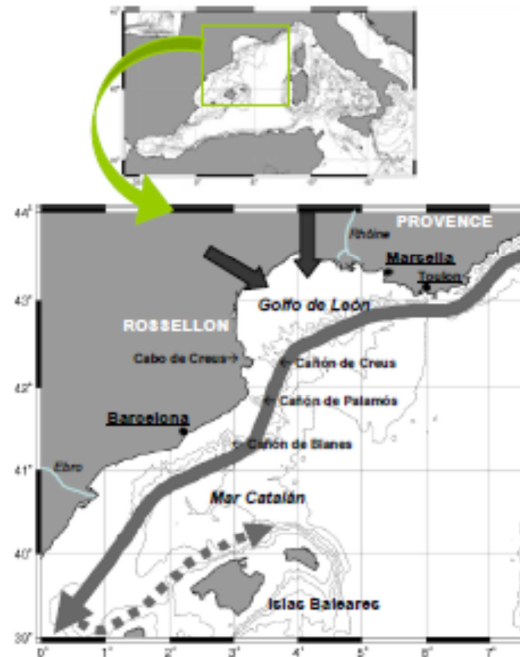


Fig. 4. Esquema de la circulación marina en el Mediterráneo Noroccidental. Isóbatas de 500, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500 metros. Modificado de Rubio (2006).

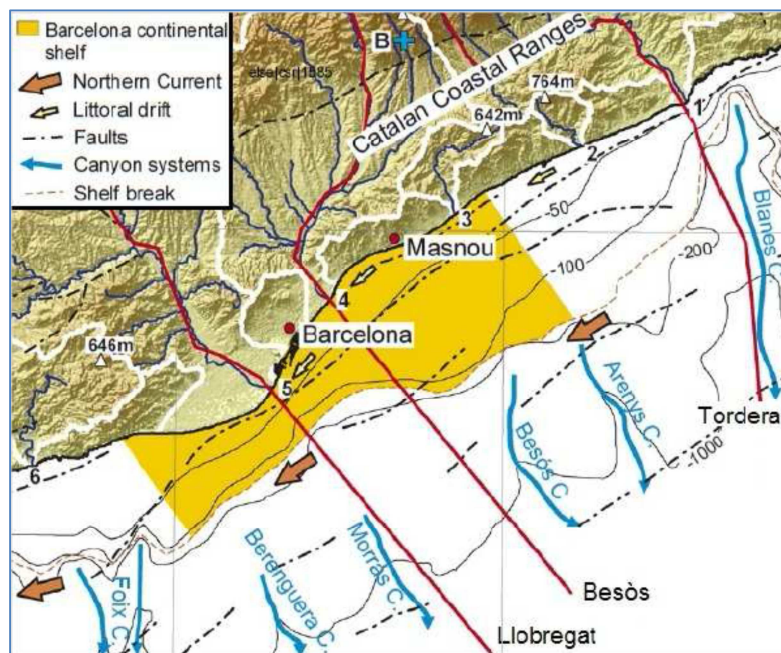


Fig. 5. Morfología costera y corrientes del área de estudio. Modificado de Just (2012).

En la Fig. 5 se muestra la dirección que sigue la corriente Corriente del Norte a su paso por nuestra zona de estudio, así como la corriente secundaria más superficial que discurre paralela a la costa. En color amarillo se indica el área que ocupa la plataforma continental de Barcelona. También están representados los principales ríos: Llobregat, Besòs y Tordera; así como los cañones submarinos mencionados en el anterior apartado.

2.3.2.2. OLEAJE

Debido a las pequeñas dimensiones que presenta el mar Mediterráneo en comparación con los grandes océanos, el oleaje generado no es capaz de propagarse durante largas distancias y, como consecuencia, el oleaje llega a la costa en un modo irregular (Fig. 6). Sin embargo, y siguiendo los criterios de Davis y Hayes (1984), la baja influencia de la marea provoca que la hidrodinámica marítima del Mediterráneo esté regida principalmente por el oleaje, siendo el agente impulsor más energético y dominante, además de principal mecanismo de agitación costero.

Según análisis estadísticos de oleaje realizados durante el período 1984-2009, se define en la región de estudio una altura de ola significativa (H_s) de 0.69 metros, un período medio (T_z) de 4.31 segundos y una altura máxima de ola (H_{max}) de 7.80 metros [XIOM, 2009].

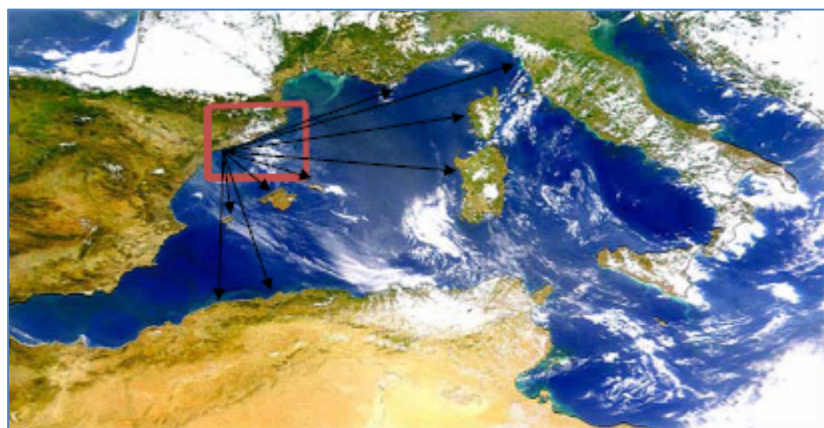


Fig. 6. Limitaciones de la distancia de propagación del oleaje (*fetch*) en el área de estudio.
Modificado de Díaz (2010).

Los eventos de tormenta que se producen en esta zona del Mediterráneo están asociados principalmente a la acción del viento, especialmente cuando éste proviene del Este, en lo que se conoce comúnmente como *llevantades*. Estas tormentas, sobre todo cuando se producen en invierno, generan oleajes muy energéticos con alturas de ola importantes que rompen en la zona costera con fuerza, causando grandes erosiones en las playas y, en ocasiones, desperfectos en las infraestructuras marítimas y portuarias.

El efecto de este tipo de tormentas en las playas de la costa catalana se hace palpable con el retroceso de la línea de orilla, debido a la erosión provocada por el oleaje. Durante estos episodios, el material erosionado se deposita alrededor del punto de rotura del oleaje, formando barras sumergidas. Tras la época de tormentas, se produce una

recuperación del perfil de playa provocada principalmente por la asimetría que caracteriza al oleaje en períodos de calma, devolviendo el sedimento a la línea de orilla y deshaciendo las barras existentes. Sin embargo, en ocasiones, tras épocas de temporales muy energéticos, este proceso natural no es suficiente para que el perfil de playa se recupere, por lo que se opta por dragar directamente las barras generadas y devolver el sedimento a la playa.

2.3.2.3. MAREAS

Una de las principales características del mar Mediterráneo es el régimen micromareal que presenta, con carreras de marea que promedian los 30 centímetros. Esto es debido a la pequeña extensión que ocupa la cuenca mediterránea, así como a su propia morfología, existiendo un único punto de conexión con un gran océano en el estrecho de Gibraltar, que une las aguas del océano Atlántico y el mar Mediterráneo.

Las mareas astronómicas, así como las mareas meteorológicas o de tormenta, son las principales causantes de las oscilaciones del nivel del mar, compartiendo ambas componentes el mismo orden de magnitud y presentándose en períodos de horas las primeras, y en períodos de días, semanas o meses las segundas. También existen variaciones estacionales del nivel del mar producidas por cambios volumétricos en la columna de agua, consecuencia de los cambios de temperatura que experimenta el agua en determinadas épocas del año.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento armónico de las mareas astronómicas, el factor de forma F determina, calculando previamente las componentes armónicas, el tipo de marea que tenemos en una determinada zona. Las constantes más importantes, calculadas a partir de una serie temporal de medidas del nivel del mar en el área de estudio, se dividen en los armónicos diurnos lunisolar (K_1) y lunar (O_1), y los armónicos semidiurnos lunar (M_2) y solar (S_2). Una vez determinados estos valores, el factor de forma se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (1)$$

De esta manera, la marea astronómica se puede clasificar según el valor obtenido en: marea semidiurna ($F < 0.25$), marea mixta con predominio semidiurno ($0.25 < F < 1.5$), marea mixta con predominio diurno ($1.5 < F < 3$) y marea diurna ($F > 3$) [Foreman, 1977]. En el caso que nos ocupa, estudios realizados indican el carácter mixto con predominio semidiurno de la marea en la zona costera de Barcelona, con valores del factor de forma que se encuentran entre 1 y 1.5. Esto se traduce en la existencia de 2 pleamares y 2 bajamares diarias con una desigualdad diurna significativa.

En cuanto a las mareas meteorológicas, la aparición de bajas presiones en el Mediterráneo genera fuertes vientos provenientes del Este y, en consecuencia, oleaje muy energético con alturas de ola elevadas, como ya se ha comentado en el apartado anterior. La combinación de estos factores deriva en un aumento significativo del nivel

del mar, que resulta ser más pronunciado si este fenómeno se produce en época estival, durante la cual la temperatura del agua es más elevada. Por el contrario, las altas presiones que se registran en la región durante los meses de verano y durante algunas semanas de Enero y Febrero, provocan una disminución importante del nivel de mar, que se convierte en más significativa si la temperatura del agua es baja.

2.3.3. CLIMATOLOGÍA

Todo el Mediterráneo occidental queda durante el verano al Este del anticiclón atlántico de las Azores. En invierno, debido a la situación mucho más meridional de las altas presiones atlánticas, la actividad ciclónica afecta de pleno al tiempo del Mediterráneo, llevando lluvias y frentes. En general, el clima de la región es templado, con inviernos moderados y lluviosos y con veranos calurosos y secos. Habitualmente los frentes, la mayoría de origen atlántico, pasan la zona de estudio de Noroeste a Sureste, mientras que las depresiones o ciclones tienen origen y dirección muy variable.

La temperatura media del aire en el litoral de Barcelona tiene su máximo en los meses de Julio y Agosto, con valores que rondan los 23-24°C, mientras que registra un mínimo en Enero, con valores entre los 9-10°C (Fig. 7). La evolución mensual de la temperatura superficial del mar, lógicamente, tiene un carácter parecido, con una temperatura media máxima en Agosto de 22.7°C, y mínima en Febrero de 12.4°C.

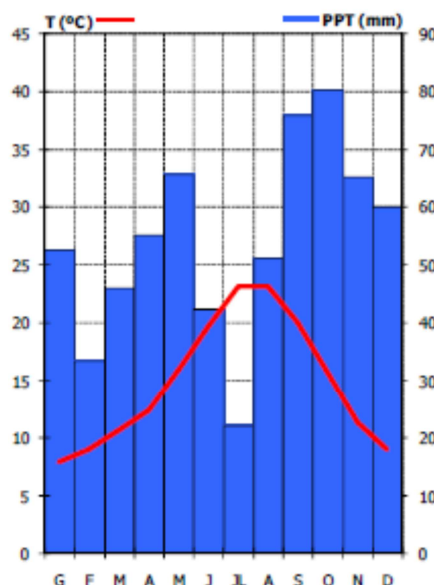


Fig. 7. Temperatura y precipitación media mensual en la comarca del Barcelonès durante el período 1971-2000. Servei Meteorològic de Catalunya.

En cuanto a la precipitación, la comarca del Barcelonès registra una media anual que ronda los 600 mm, siendo estos valores más elevados cerca de la cordillera litoral. La estación más lluviosa del año es el otoño, seguida de la primavera, mientras que la más seca es el verano, sobre todo el mes de Julio.

Las borrascas que se generan o reactivan en el Mediterráneo occidental envían vientos cálidos y cargados de humedad hacia la costa. Estos vientos de levante ascienden por

los relieves montañosos condensándose rápidamente y desencadenando fuertes lluvias. En estas condiciones, la presencia de una “gota fría” o de un frente de aire frío puede originar que las precipitaciones se vuelvan torrenciales. Los temporales de otoño afectan a menudo a grandes extensiones del territorio catalán y las crecidas se producen simultáneamente en diversas cuencas fluviales, lo que hace que, en la desembocadura de los cursos principales, los caudales sean extraordinarios.

2.3.3.1. VIENTOS

En el Mediterráneo Noroccidental los vientos predominantes provienen del Noroeste (Mestral) y del Norte (Tramuntana) principalmente durante diciembre y enero. Vientos del Sur (Migjorn) y del Este (Levante) son también importantes especialmente durante los meses Noviembre, Febrero, Marzo y Abril y están asociados a tormentas. La Tramuntana y el Mestral son vientos de bajo nivel favorecidos por la orografía. Frecuentemente se observa que se extienden varios cientos de kilómetros fuera de la costa trayendo con ellos aire frío y seco sobre el mar. Estos vientos son una de las principales causas de tormentas entre Italia y las islas Baleares. Los vientos en la región del Mediterráneo están afectados por las fronteras montañosas que pueden canalizar los flujos del viento hacia el mar, incrementando sus velocidades. Existen muchos vientos identificados en esta región, de los cuales los más importantes para la costa catalana son el Levante y el Mestral [Bolaños et al., 2004].

En el Mediterráneo los vientos pueden clasificarse en dos temporadas: invierno (de Octubre a Mayo) y verano (de Junio a Septiembre). La temporada hibernal está asociada a un clima más activo, mientras que la temporada veraniega está asociada a condiciones de calma en la superficie.

También es necesario resaltar la extraordinaria importancia de los regímenes de brisas de mar y tierra sobre la circulación marina. Las células convectivas típicas de brisa varían en dimensiones y propiedades, básicamente en función de la época del año, siendo las más notables las de primavera y verano, si bien se presentan con regularidad durante todo el año. Periódicamente se observa brisa de tierra hacia mar (terral) que sopla del Nornoroeste durante la noche, y una brisa de mar a tierra (marinada) que sopla del Sursudoeste durante el día.

2.3.4. HIDROGRAFÍA

Un aspecto importante que debe ser considerado es la aportación de agua dulce que realizan los principales ríos de esta zona costera, el río Llobregat y el río Besòs, al mar Mediterráneo. Estos dos ríos son los principales responsables de la aportación de sedimento a la plataforma continental de Barcelona, como se describe en el apartado que trata el transporte de sedimentos (2.3.5.). Además, también se deben tener en cuenta la existencia de colectores y emisarios ya que, sobre todo en episodios de desbordamiento de la red de alcantarillado, pueden ser fuente importante de aporte de sedimentos.

2.3.4.1. EL RÍO LLOBREGAT

El Llobregat es uno de los principales ríos mediterráneos de la geografía catalana y uno de los grandes ríos prepirenaicos. Históricamente, su curso ha sido muy importante para la población catalana de las zonas que atraviesa, puesto que sus aguas han servido para usos agrícolas, industriales y de consumo, entre otros, manteniéndose en la actualidad estos aprovechamientos.

Su cuenca hidrográfica es muy extensa (4948 km²) y abarca las comarcas catalanas del Berguedà, Bages y Baix Llobregat situadas en su recorrido, además del Solsonès, Anoia y Alt Penedés situadas al Oeste, y Osona, Vallés Occidental y Oriental situadas el Este. Como afluentes principales, el Llobregat cuenta con el Cardener y el Anoia, así como con las rieras de la Gavarresa, Merlés, Rubí y Calders (Fig. 8).

El río nace en las denominadas fuentes del Llobregat, situadas a 1295 metros sobre el nivel del mar, en el municipio de Castellar de n'Hug (Berguedà), y desemboca en el mar Mediterráneo en el municipio del Prat de Llobregat. En su recorrido de 175 km de longitud, atraviesa transversalmente los dominios estructurales del Prepirineo, de la depresión Central y de las cordilleras Prelitoral y Litoral.



Fig. 8. Cuenca hidrográfica del río Llobregat.

El relieve y el clima de las zonas que atraviesa el río son muy variables dependiendo del tramo de recorrido, y determinan un caudal relativamente alto pero muy irregular. El Llobregat presenta un caudal que varía de un año a otro, así como entre meses y estaciones del mismo año, pero se adapta a un modelo tipo torrencial propio de un río en el clima mediterráneo. De esta manera, presenta un caudal medio de 17.8 m³/s en

Castellbell y de $21 \text{ m}^3/\text{s}$ en Martorell, aunque al acercarse a la desembocadura disminuye a $15.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en Sant Joan Despí. El caudal medio durante todo el recorrido es de $19 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.3.4.2. EL RÍO BESÒS

El Besòs es el segundo río más importante de la región, después del Llobregat. Su nacimiento se localiza en el municipio de Parets del Vallès (Vallès Oriental), donde se unen las aguas de los ríos Mogent y Congost, y desemboca en el Mediterráneo en el término municipal de Sant Adrià del Besòs. Además, su recorrido incluye su paso por los municipios de Montcada i Reixac, Santa Coloma de Gramanet y Barcelona.

Aunque su curso es relativamente corto, sólo 17.7 km , su cuenca hidrográfica tiene una superficie total de 1038 km^2 . Ésta se sitúa entre las cordilleras Prelitoral y Litoral, y sus aguas se abren paso a través de la depresión del Vallès (Fig. 9). Las aguas de esta cuenca son recogidas por los cinco principales afluentes del Besòs: la riera de Caldes, los ríos Tenes y Ripoll, y los ya mencionados ríos Mogent y Congost.

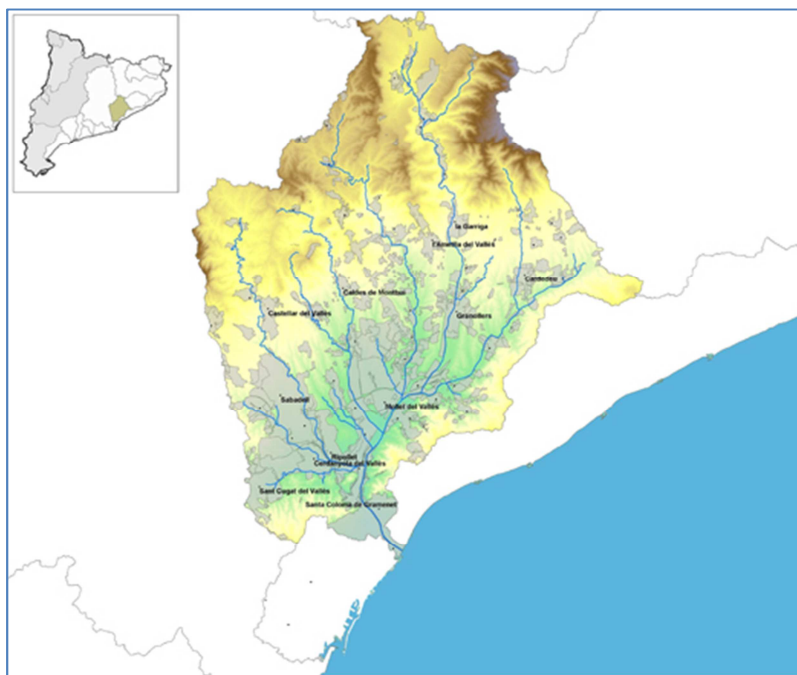


Fig. 9. Cuenca hidrográfica del río Besòs. Agència Catalana de l'Aigua (ACA).

La cuenca del Besòs, la más poblada de Catalunya con más de 2 millones de habitantes, es deficitaria en recursos hídricos, importando del sistema Ter-Llobregat dos terceras partes del agua que consume. Esto se debe al régimen hidrológico típicamente mediterráneo que tiene esta cuenca, con caudales muy irregulares a lo largo del año, presentando caudales de estiaje muy bajos, del orden de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en la desembocadura, pudiendo superar los $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante una avenida, aunque su caudal medio se sitúa en torno a los $4.33 \text{ m}^3/\text{s}$. En septiembre de 1962, durante las grandes inundaciones que ocasionaron numerosas víctimas y pérdidas materiales, se llegó a registrar un caudal de casi $2300 \text{ m}^3/\text{s}$. En aquel entonces se decidió, entre otras actuaciones, levantar un muro

de 130 m de ancho por 4 m de altura para canalizar los últimos 9 km del río. A partir de entonces, y sobre todo en los últimos años, han sido muchas las actuaciones que se han llevado a cabo para mejorar la calidad ambiental y paisajística del lecho del río.

2.3.4.3. COLECTORES Y EMISARIOS

Como se ha comentado anteriormente, se debe tener en cuenta la existencia de varios colectores y emisarios que se encuentran a lo largo de la costa en nuestra zona de estudio.

La depuradora del Besòs, que entró en funcionamiento en 1979, descarga sus aguas al Mediterráneo mediante un emisario de 4 km situado cerca de la isóbata 56 m, con un rango de caudales de $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12.4 \text{ m}^3/\text{s}$ [Gómez et al., 1996].

En cuanto a las aguas urbanas que recoge el alcantarillado, son conducidas hasta diversos colectores dispuestos a lo largo de la costa. Entre ellos destacan los colectores que descargan sus aguas en los espigones de Ginebra (también llamado espigón del Gas y situado en la playa de la Barceloneta), de Bogatell, de Bac de Roda y de Prim (Fig. 10).

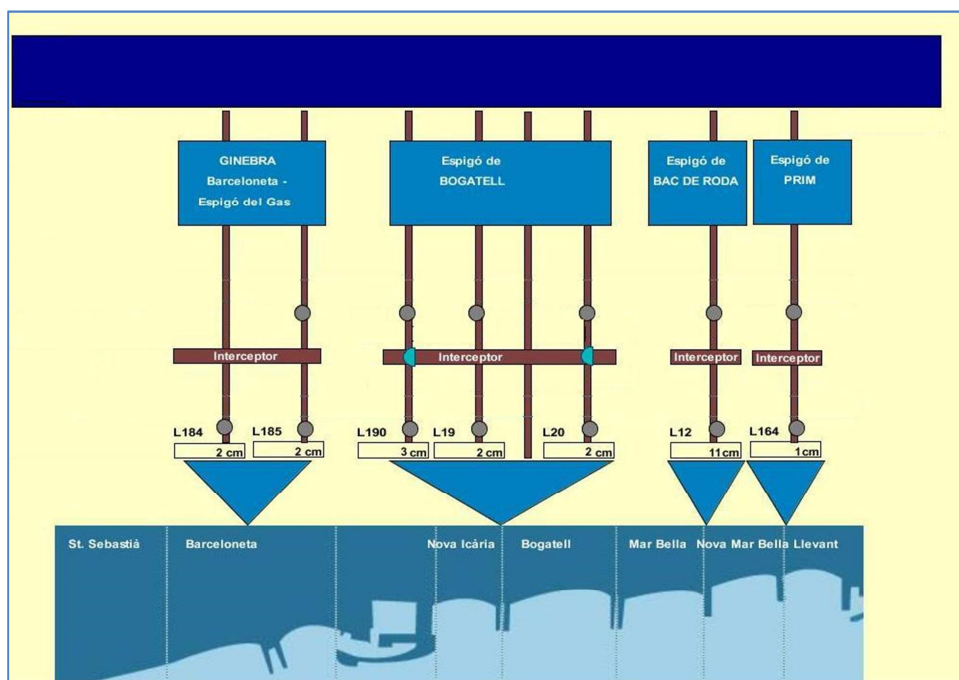


Fig. 10. Plano esquemático de la situación de los colectores en la costa de Barcelona.

2.3.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El tramo de costa inherente a nuestra zona de estudio, al tratarse de un sector altamente influenciado y modificado por la acción humana, con importantes variaciones del perfil litoral original, cuenta con áreas protegidas concretas para la deposición de sedimentos, así como también tramos que sufren la erosión costera. Las principales variaciones del perfil litoral se hacen notables en los puertos y muelles construidos, así como también

en las obras de protección costera. Este desequilibrio provocado en la sedimentación de la zona hace necesaria en diversas ocasiones la regeneración de las playas mediante aportaciones de arena, como ya se ha comentado en apartados anteriores.

El aporte de sedimentos a la plataforma continental de Barcelona depende principalmente del río Llobregat, seguido de los ríos Besòs y Tordera. A pesar de la mayor aportación del Llobregat, esta zona presenta una menor anchura de plataforma, consecuencia de las corrientes existentes en dirección Sur.

El transporte de sedimentos tiene su origen en las corrientes marinas y el oleaje. En general, se puede afirmar que el efecto de las olas sobre el fondo marino empieza a ser perceptible a partir de una profundidad igual, o inferior, a la mitad de la longitud de la onda. En el litoral de Barcelona, debido a los ya comentados oleajes provenientes predominantemente del Este, existe una corriente de plataforma con dirección Suroeste. Esta corriente secundaria sigue un curso paralelo alrededor de la costa que la convierte en el principal fenómeno movilizador de material sedimentario (Fig. 5). Este transporte de sedimentos se ve incrementado cuando se producen las ya mencionadas *llevantades*, siendo la corriente capaz de movilizar grandes cantidades de sedimento desplazándolo hacia zonas más profundas de la plataforma, o bien depositándolo en las desembocaduras de los cañones submarinos [Canals et al., 2007].

A lo largo de la plataforma continental se pueden observar tres tipos de sedimento en el lecho marino. En las zonas menos profundas, desde la orilla hasta las isóbatas 15-20 m, encontramos una mayoría de arena bien clasificada. A continuación, entre las batimétricas 20 y 60 m, el lecho presenta acumulaciones de lodo, en el que se encuentran limos y arcillas en proporciones mayores del 80%. Por último, desde los 60 metros de profundidad hasta el final de la plataforma, el lecho está constituido únicamente por lodo [Palanqués, 1993].

3. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA

3.1. INTRODUCCIÓN

La realización de este estudio se basa principalmente en los datos obtenidos durante la segunda campaña del proyecto FIELD_AC, en el que participa el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC. Durante esta campaña, que se llevó a cabo desde el 11 de Marzo de 2011 hasta el 18 de Abril del mismo año, se instalaron instrumentos de medición en diferentes puntos del litoral de Barcelona.

Además de los datos recogidos durante dicha campaña, se dispone de los datos proporcionados por los instrumentos de medición de la Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics (XIOM) en sus localizaciones de Badalona (Pont del Petroli) y Llobregat, para el mismo período de tiempo.

A continuación, se facilita la localización de los puntos costeros en los que se situaron dichos instrumentos, así como una descripción de las características de los mismos.

3.2. LOCALIZACIÓN

Los datos utilizados en este estudio fueron tomados en cinco puntos diferentes del litoral barcelonés.

Las estaciones A1, A2 y A3, tal como serán nombradas de ahora en adelante, formaron parte de la segunda campaña FIELD_AC y su localización se puede apreciar en la Fig. 11. Las estaciones A1 y A2 se fondearon a una profundidad de 24 metros, la primera frente al aliviadero de Bogatell y la segunda frente a la desembocadura del río Besòs. La estación A3, sin embargo, se situó en aguas más profundas, concretamente sobre la isóbata de 50 metros. Además, en la misma figura, se muestra la posición de la estación Badalona, tal como será nombrada en los siguientes capítulos, situada en la parte más profunda del Pont del Petroli, donde la isóbata es de aproximadamente 12 metros.

La estación Llobregat, como será nombrada de ahora en adelante aunque esté compuesta por dos boyas, se encuentra situada unos 15 km al sur de las anteriores, frente a la desembocadura del río Llobregat y sus boyas se encuentran fondeadas a 45 metros de profundidad. En la Fig. 12 se puede apreciar su posición respecto a las estaciones mencionadas anteriormente.



Fig. 11. Localización de las estaciones A1, A2, A3 y Badalona.



Fig. 12. Localización de la estación Llobregat.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES

En este apartado se detallan las principales características de cada estación. En las tablas numeradas de la 1 a la 5 se muestra, para cada estación: su localización exacta, la profundidad a la que se encuentra el lecho marino en dicho punto, las fechas de instalación y recuperación, los instrumentos que incorpora y las mediciones que realizan dichos instrumentos. Cabe resaltar que las estaciones A1, A2 y A3, al corresponder a la campaña FIELD_AC, cuentan con una fecha de instalación y de recuperación, mientras que las estaciones Badalona y Llobregat, al pertenecer a la XIOM, son instalaciones permanentes, por lo que no se mencionan estos datos.

Tabla 1. Características e instrumentación de la estación A1.

Localización	41°23.207'N - 02°12.647'E
Profundidad	24 metros
Fecha de instalación	11/03/2011 09:45 UTC
Fecha de recuperación	18/04/2011 08:00 UTC
Instrumento	Medición
AWAC / AST WPR 117 / WAV 5786	Perfil de corrientes Oleaje direccional
OBS T8280	Turbidez
Aquatec Aqualogger 201TY / 024-14	Turbidez

Tabla 2. Características e instrumentación de la estación A2.

Localización	41°24.852'N - 02°14.531'E
Profundidad	24 metros
Fecha de instalación	11/03/2011 10:55 UTC
Fecha de recuperación	18/04/2011 09:45 UTC
Instrumento	Medición
AWAC / AST WPR 052 / WAV 5604	Perfil de corrientes Oleaje direccional
OBS T8281	Turbidez
Aquatec Aqualogger 201TY / 024-17	Turbidez

Tabla 3. Características e instrumentación de la estación A3.

Localización	41°23.950'N - 02°15.567'E
Profundidad	50 metros
Fecha de instalación	11/03/2011 11:15 UTC
Instrumento	Medición
RDI WH300	Perfil de corrientes
Localización	41°23.919'N - 02°15.486'E
Profundidad	50 metros
Fecha de instalación	12/11/2011 08:13 UTC
Instrumento	Medición
Boya Datawell Directional G7	Oleaje direccional

Tabla 4. Características e instrumentación de la estación Badalona.

Localización	41°26.410'N - 02°14.936'E
Profundidad	12 metros
Instrumento	Medición
Nortek Aquadopp	Velocidad de corriente (-5m) Oleaje direccional
BWS200	Meteorología

Tabla 5. Características e instrumentación de la estación Llobregat.

Localización	41°16.520'N - 02°08.260'E
Profundidad	45 metros
Instrumento	Medición
Boya AANDERAA 4700	Velocidades de corriente (-15m y -1m) Meteorología
Localización	41°16.690'N - 02°08.480'E
Profundidad	45 metros
Instrumento	Medición
Boya Datawell Waverider	Oleaje direccional

3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS

A continuación se detallan las propiedades de los instrumentos de medición más relevantes instalados en cada estación, así como una breve explicación de su modo de funcionar.

3.4.1. AWAC

Este instrumento, que además de trabajar como perfilador de corrientes nos proporciona datos de oleaje direccional, se encuentra instalado en las estaciones A1 y A2. Como perfilador de corrientes, su función es registrar la velocidad y dirección de las corrientes a diferentes profundidades. En este caso, proporciona mediciones para cada capa de 1 metro de espesor, generando un perfil de corrientes que va desde la profundidad en la que se encuentra instalado hasta la superficie del mar. Como se ha mencionado, puede medir también oleaje de todo tipo, incluyendo ondas largas, olas de viento, temporales e incluso estelas de barcos que pasen por encima del instrumento [www.nortek-es.com]. Todo ello se deberá tener en cuenta en el control de calidad que se realizará en el siguiente capítulo.

El AWAC fue diseñado como un sistema de medida costero. Es pequeño, robusto y adecuado para fondeos a largo plazo en ambientes hostiles. El equipo está fabricado en plástico y titanio para evitar corrosiones. Normalmente se fondea en una estructura estable junto al fondo, alejado de las complicadas condiciones superficiales en cuanto a clima, paso de barcos o actos vandálicos. Puede ser usado en modo on-line mediante cables de hasta 5 km o mediante módems acústicos, o en modo independiente, en el que el aparato se alimenta de baterías y almacena datos en una memoria interna [www.nortek-es.com]. Esta segunda modalidad ha sido la utilizada en la campaña, por lo que los datos registrados se han tenido que procesar una vez el instrumento ha sido recuperado.

La tecnología utilizada en el caso de la toma de datos referidos a corrientes consiste en un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). La técnica se basa en una detección acústica de las partículas suspendidas en el agua a través de 4 transductores, uno vertical y los otros 3 situados con una inclinación de 25° respecto a la vertical. Al emitir un impulso desde cada uno de los transductores, las partículas en suspensión producen ecos que son percibidos por el ADCP, permitiendo así estimar la magnitud y dirección de la corriente [Pedersen et al., 2004]. Dependiendo de la profundidad a la que se quiera instalar el instrumento, existen diferentes tipos de AWAC clasificados según su frecuencia acústica (1 MHz, 600 kHz y 400 kHz). A mayor profundidad, menor debe ser la frecuencia para obtener resultados óptimos. En nuestro caso, el instrumento utilizado contaba con una frecuencia acústica de 1 MHz, ya que la profundidad de fondeo era de 24 metros. En la Fig. 13 se puede observar un AWAC junto con un esquema de su funcionamiento.

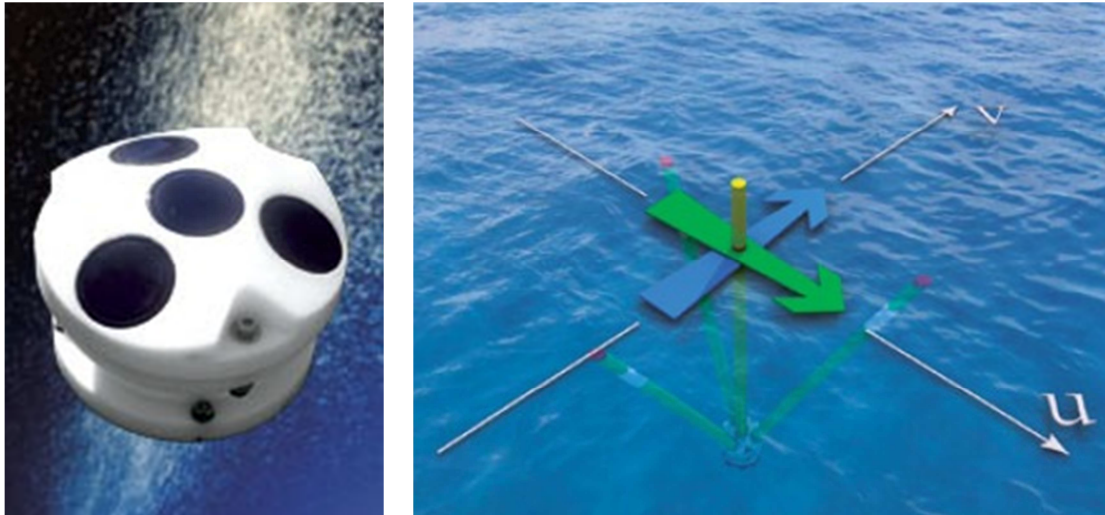


Fig. 13. Imagen de un AWAC de frecuencia acústica 1 MHz (izquierda) y esquema de funcionamiento de los transductores (derecha) [www.nortek-es.com].

La novedad que presenta este instrumento es el equipamiento opcional del AST (*Acoustic Surface Tracking*). Se trata esencialmente de una detección acústica de la superficie mediante un transductor vertical. Gracias a esta función se eliminan las limitaciones que tienen los sistemas de medida de oleaje basados en la presión y la velocidad. Ya sea con mar de fondo (swell) u oleaje de viento (sea), la función AST es capaz de determinar el estado de mar y estimar parámetros de oleaje basados en el análisis de series temporales. Esto significa que el AWAC puede medir directamente variables como H_{\max} , $H_{1/10}$, T_{mean} , etc. [www.nortek-es.com].

La Fig. 14 muestra el momento en el que se está llevando a cabo la instalación de este tipo de instrumento, pudiéndose apreciar la estructura que lo soporta y los componentes adicionales y necesarios para su funcionamiento, como son por ejemplo la batería o la memoria interna.



Fig. 14. Instalación de un AWAC en el punto de fondeo [www.terrasond.com].

3.4.2. RDI WH300

Este instrumento es el responsable de los datos correspondientes al perfil de corrientes de la estación A3. De la misma forma que el AWAC, también utiliza la tecnología ADCP explicada con anterioridad. En este caso, el instrumento está compuesto por 4 transductores en posición convexa, con una inclinación de 20° respecto a la vertical, tal como se puede observar en la Fig. 16. Esta disposición de transductores proporciona datos redundantes para asegurar un óptimo funcionamiento en caso de que alguno de ellos deje de funcionar repentinamente.

Dependiendo de la profundidad de fondeo, este ADCP dispone también de diferentes tipos de instrumento clasificados según su frecuencia acústica (1200 kHz, 600 kHz y 300 kHz) [www.rdiinstruments.com]. La frecuencia acústica utilizada en nuestro caso es de 300 kHz, ya que el fondeo se realizó a una profundidad de 50 metros. En la Fig. 15 se puede apreciar el esquema de fondeo de un RDI WH.

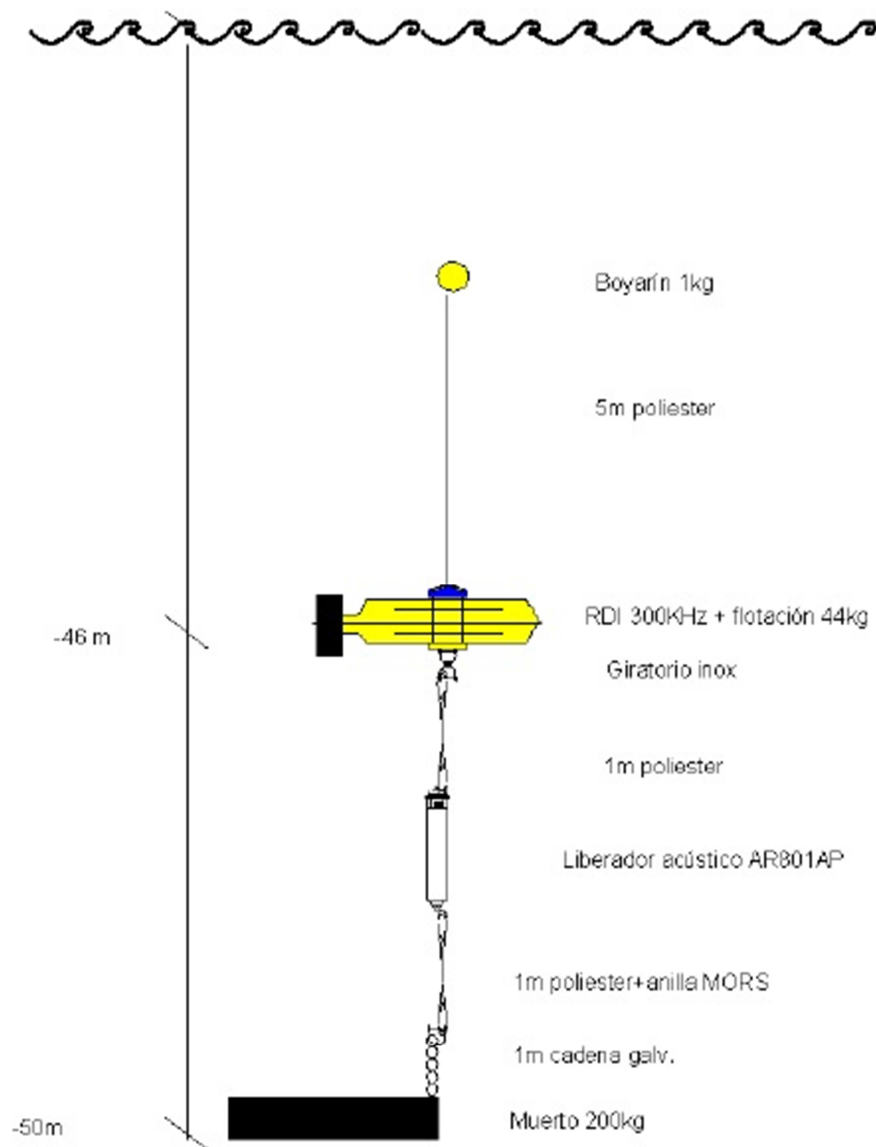


Fig. 15. Esquema de fondeo de un RDI WH. Modificado de Armengou (2011).



Fig. 16. Imagen de un RDI WH [www.rdinstruments.com].

3.4.3. NORTEK AQUADOPP

El perfilador Aquadopp es el dispositivo responsable de la toma de datos de oleaje direccional y velocidad de corriente a 5 metros de profundidad, en la estación Badalona.

Este instrumento, introducido en el mercado en el año 2000, supuso la aparición de una nueva generación de perfiladores de corrientes. Funciona utilizando el método de autocovarianza para asegurar datos precisos y fiables, conservando las ventajas tradicionales de los sistemas acústicos Doppler, como la insensibilidad a la bioacumulación o la ausencia de partes móviles o protuberantes.

Como principales ventajas cabe destacar sus 2.4 kg de peso, que permite llevar fácilmente más de uno en cada brazo, y su sencilla técnica de fondeo, que permite su instalación en emplazamientos no viables hasta su aparición. La electrónica del sistema integra la velocidad Doppler con sensores de temperatura, presión, inclinación y orientación. Trabaja bien tanto en aguas superficiales como en aguas con partículas en suspensión, como puede ocurrir cerca de la costa o en ríos [www.nortek-es.com]. Otro de sus puntos fuertes es la gran variedad de diseño de cabezales que puede utilizar, asegurando las condiciones de medida óptimas independientemente del entorno del fondeo (Fig. 17).

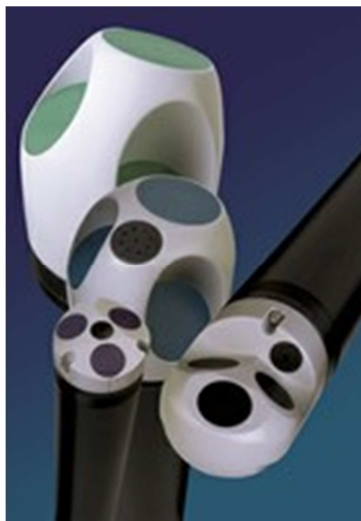


Fig. 17. Perfiladores Aquadopp en sus diferentes configuraciones de cabezal [www.nortek-es.com].

3.4.4. BOYA AANDERAA 4700

Esta boya, situada en la estación Llobregat, nos proporciona datos de velocidades de corriente a profundidades de 1 y 15 metros, así como también datos meteorológicos como velocidad y dirección del viento. Aunque también es capaz de medir altura y período de ola, estos datos nos los proporciona la boya de oleaje direccional situada en sus cercanías y que se describe en el siguiente subapartado (3.4.5.).

La boya oceanográfica de Aanderaa Data Instruments (Fig. 18) mide, además de los conceptos ya indicados, temperatura, salinidad, turbidez, pH, oxígeno y conductividad del agua. Esta boya, pensada para uso costero, en puertos y cerca de plataformas *offshore*, se compone de un flotador hecho de polietileno flexible y resistente a golpes, con capacidad de albergar los instrumentos de medida, el sistema telemétrico y el sistema de alimentación fotovoltaico.

El corazón de esta boya es el Datalogger 3860, que es quien gestiona y almacena las medidas. Si tiene conectado un módem GSM/GPRS, se puede llamar a la boya y bajar los datos remotamente.

Debido a su pequeño tamaño, su instalación es sencilla. Otras ventajas que presenta son robustez, compacidad y ligereza, garantizando una alta fiabilidad y con un bajo coste de mantenimiento. La alimentación se realiza a través de placas solares y baterías recargables [www.sidmar.es].

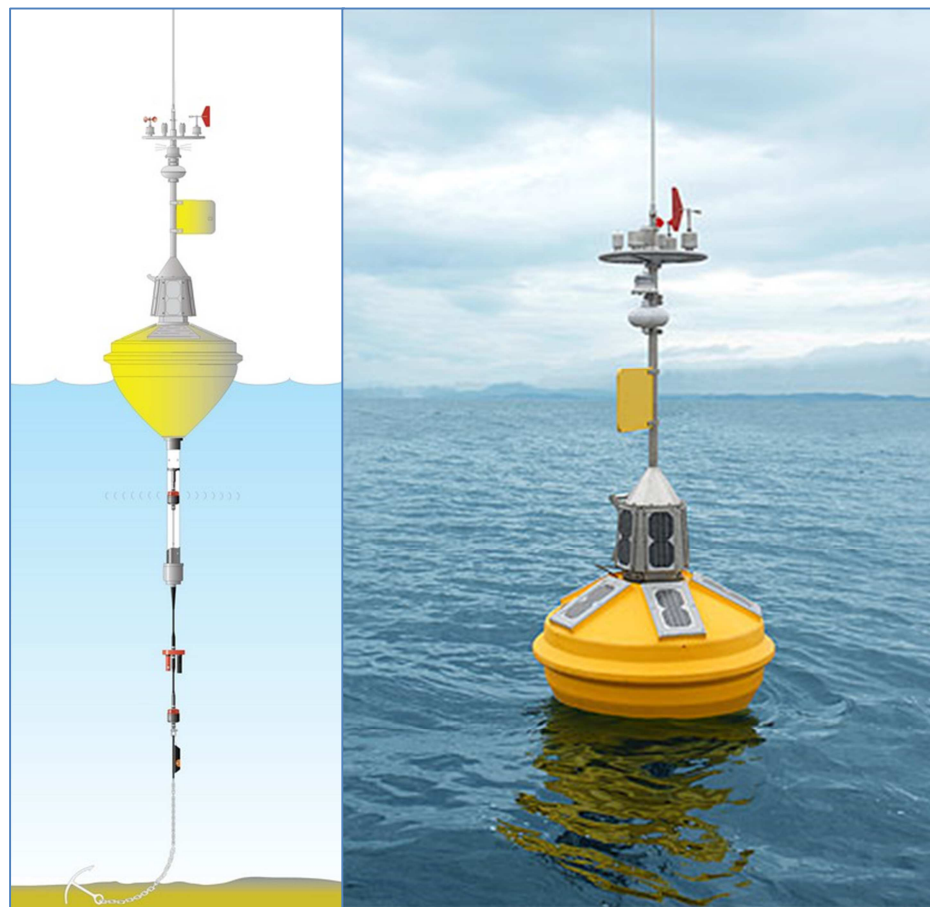


Fig. 18. Boya AANDERAA 4700. Esquema de fondeo (izquierda) y boya en funcionamiento (derecha).

3.4.5. BOYAS DATAWELL DIRECTIONAL G7 Y DATAWELL WAVERIDER

Estas dos boyas, fabricadas por la compañía Datawell, son las encargadas de la medición de datos de oleaje direccional en la estación A3 la primera, y en la estación Llobregat la segunda. Aunque su aspecto exterior se asemeja bastante (Fig. 19), cada una de estas boyas utiliza un sistema de medición diferente.

Empezando por la segunda, la boya Datawell Waverider se caracteriza principalmente por la incorporación de un sensor de estabilidad localizado en su plataforma, el cual permite la medición de la altura de ola por medio de solo un acelerómetro. La dirección del oleaje se determina a través de las mediciones de cabeceo y alabeo del instrumento, sin necesidad de integraciones. El equipo se completa con acelerómetros horizontales y una brújula.

La boya Datawell Directional G7 se diferencia de la boya Datawell Waverider en el sistema de medición. Las mediciones se realizan con la ayuda del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Este instrumento, programado con un algoritmo patentado y equipado con un receptor GPS fabricado a medida, puede medir oleaje direccional sin necesidad de calibración alguna [www.datawell.nl].



Fig. 19. Boyas Datawell Directional G7 (izquierda) y Datawell Waverider (derecha) [www.datawell.nl].

3.4.6. BASIC WEATHER STATION BWS200 SERIES

El dispositivo BWS200 (Fig. 20), fabricado por la empresa Campbell Scientific, es una estación automática de toma de datos meteorológicos alimentada por una placa solar y equipada con un conjunto estándar de sensores capaces de poder medir temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitaciones [www.campbellsci.co.uk]. En nuestro caso, nos proporcionará datos de intensidad y dirección del viento en la estación Badalona.



Fig. 20. Basic Weather Station (BWS200).

3.4.7. OBS T8280

Este instrumento, instalado en las estaciones A1 y A2, mide la turbidez del agua así como la concentración de sólidos en suspensión. Las siglas OBS provienen de las palabras inglesas Optical Backscatter Sensor, que en español se traduce como “sensor óptico de retrodispersión”.

Consiste en un emisor de infrarrojos de alta intensidad (IRED), un detector (cuatro fotodiodos) y un transductor lineal de temperatura. El sensor, con un diámetro y longitud de unos 20 centímetros y 50 centímetros respectivamente, mide la radiación infrarroja dispersada por la materia suspendida en el agua en ángulos de 140-165°. La medida, forma y tamaño de estos sólidos en suspensión tiene una influencia directa en la respuesta del OBS. La insensibilidad del instrumento a las burbujas o al fitoplancton, así como su bajo coste son algunos de los aspectos que hacen del OBS un sensor de turbidez con excelente rendimiento [www.d-a-instruments.com].

3.4.8. AQUATEC AQUALOGGER 201TY

Este instrumento, como sucede con el anterior, se encuentra instalado también en las estaciones A1 y A2. Nos proporciona valores de turbidez, aunque con una metodología diferente al OBS.

Este modelo en concreto consta de un data logger (registrador de datos) y de un SeaPoint Turbidity Meter (STM) incorporado, el cual hace uso del sensor de retrodispersión óptico. La longitud de la fuente de luz es de 880 nm y los detectores constan de filtros de bloqueo de luz. La luz, dispersada en ángulos de entre 15° y 150°, pasa a través de estos filtros en dirección al detector [www.aquatecgroup.com].

4. PROCESADO Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

4.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se procederá a presentar y analizar cualitativamente el conjunto de los datos recopilados para la realización del estudio. El objetivo de este apartado es detectar los errores instrumentales que se hayan podido producir durante la toma de datos. De esta manera, y buscando un resultado lo más fiel posible a la realidad, obtendremos los gráficos definitivos que nos servirán de punto de partida para su posterior análisis y estudio. Además, para determinados conjuntos de datos, como por ejemplo los correspondientes a la turbidez o la velocidad de la corriente, se realizarán algunas transformaciones con el fin de obtener nuevas representaciones que permitan una visión diferente de los mismos.

4.2. GENERALIDADES

Antes de analizar uno por uno el conjunto de datos para cada categoría e instrumento, se exponen a continuación los principales factores que causan alteraciones en la toma de datos por parte de los instrumentos.

El primer factor de alteración que se debe tener en cuenta son la instalación y posterior retirada de cada uno de los instrumentos que forman parte de la campaña FIELD2, puesto que su encendido y apagado se realiza *in situ* en el punto de fondeo seleccionado, es decir, antes y después de ser introducidos y retirados del agua. Esto explica que, durante los dos períodos de tiempo mencionados, los datos reflejen una alteración importante, con valores medidos que están fuera de rango.

Cabe resaltar que este fenómeno sólo se produce en los datos recopilados por los instrumentos de la campaña FIELD2, puesto que el resto de datos han sido medidos por instrumentos que, en relación al período de tiempo que deseamos estudiar, ya fueron instalados con anterioridad y han continuado funcionando con normalidad tras la finalización de dicho período.

Con el objetivo de ilustrar este fenómeno, la Fig. 21 muestra un ejemplo de dichas alteraciones.

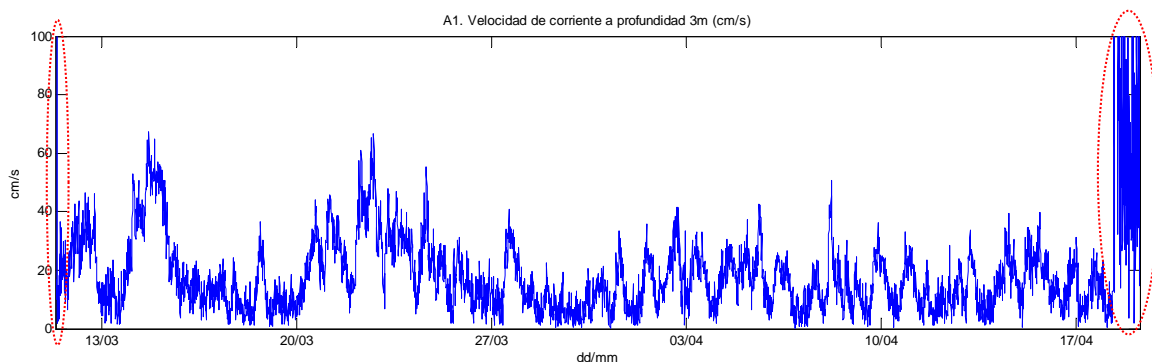


Fig. 21. A1. Velocidad de corriente a profundidad 3 metros. Datos sin procesar.

Lógicamente, los datos tomados durante dichos períodos de tiempo no serán tenidos en cuenta en el posterior estudio. Así pues, finalmente, los gráficos definitivos comprenderán datos desde el 11/03/2011 a las 17:30 hasta el 18/04/2011 a las 05:30. Con el fin de unificar criterios, los datos recopilados por los aparatos que no forman parte de la campaña FIELD2 también serán representados durante este período.

El segundo factor de alteración a considerar está relacionado con la aparición de picos espurios que aparecen al representar los datos. Estos son producidos por diferentes motivos en cada caso, como pueden ser, a modo de ejemplo, el paso de algún objeto o animal por la trayectoria de un sensor óptico de retrodispersión (OBS) o la circulación de alguna embarcación en las cercanías de una boya de oleaje. Generalmente, estos errores de medición se producen por fenómenos externos al instrumento. Este tipo de alteración afecta a todos los instrumentos que se han utilizado, tanto los que conforman la campaña FIELD2 como aquellos que se encuentran fijos.

En la Fig. 22 se puede apreciar la existencia de una gran cantidad de alteraciones de este tipo, así como la existencia de errores de medida en los períodos inicial y final, correspondientes al primer tipo de factor de alteración mencionado.

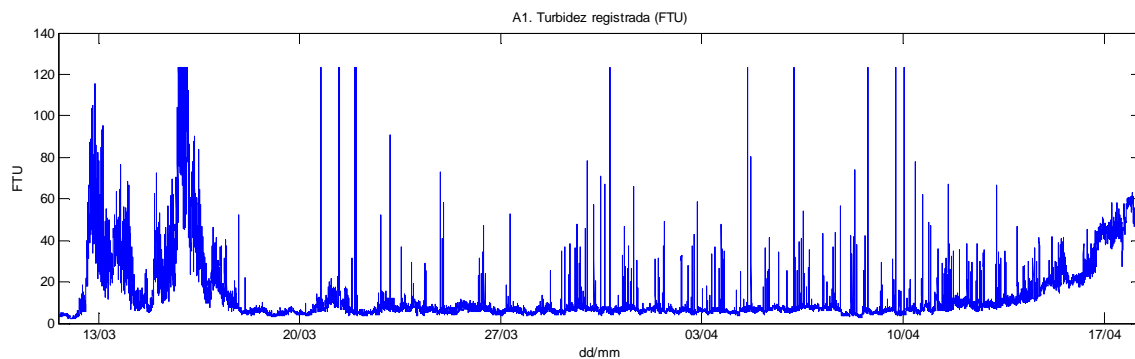


Fig. 22. A1. Turbidez registrada por el turbidímetro. Datos sin procesar.

Además de las dos tipologías nombradas, cada tipo de medición tiene sus particulares factores de alteración. A modo de ejemplo, en la Fig. 22 se puede observar que en los últimos días se produce una subida constante en el nivel de turbidez, producida en este caso por el incremento de suciedad que iba cubriendo el turbidímetro.

Con el fin de eliminar estas alteraciones se procederá a aplicar las correspondientes correcciones y filtros a los conjuntos de datos que así lo requieran.

A continuación se detallan las actuaciones realizadas en los conjuntos de datos recopilados para cada categoría e instrumento.

4.3. CORRIENTES

Como ya se ha expuesto en el capítulo anterior, disponemos de datos de velocidad y dirección de la corriente en los diferentes puntos de la zona de estudio.

4.3.1. ESTACIONES A1 Y A2

Los puntos de estudio A1 y A2, gracias a los perfiladores de corrientes AWAC instalados, proporcionan mediciones a diferentes profundidades, correspondientes a las 25 celdas que componen cada perfilador. La profundidad de fondeo es de 24 metros en ambas estaciones y la celda más profunda se halla situada 0.41 metros por encima del lecho marino. Teniendo en cuenta que cada celda tiene un espesor de 1 metro, disponemos de mediciones desde los 23 hasta los 3 metros de profundidad, es decir, desde la capa más profunda (número 1) hasta la capa más superficial y válida (número 21). El número total de datos que se encuentran dentro del período de estudio seleccionado, al proporcionarse mediciones cada 10 minutos, es de 5401 para cada capa e instrumento.

Las capas 22 y 23 no se han tenido en cuenta por su proximidad a la superficie ya que, a esas profundidades (2 y 1 metros), la señal acústica que utilizan los perfiladores puede verse alterada por sonidos externos. Además, pueden registrarse errores de medición causados por posibles variaciones puntuales del nivel del mar. Las capas 24 y 25, al encontrarse por encima de la superficie del mar, tampoco se han tenido en cuenta.

Así pues, para realizar el estudio se han seleccionado las mediciones realizadas a 3 profundidades: 23 metros (capa 1), 13 metros (capa 11) y 3 metros (capa 21). Estas mediciones han sido registradas en términos de velocidad de corriente en componentes Este y Norte, tomando valores positivos en dichas direcciones y valores negativos en caso de que las componentes sean Oeste o Sur en cada caso, todo ello en unidades de m/s. Por ello, y con el objetivo de unificar criterios, se ha procedido a transformar estos datos a términos de módulo de velocidad y dirección (azimut), en unidades de cm/s y grados sexagesimales respectivamente. Cabe mencionar que, tanto en estas dos estaciones como en las que siguen a continuación, las direcciones representadas muestran las orientaciones que toma la corriente, es decir, hacia dónde va.

En cuanto a los posibles errores de medición, no se han detectado valores fuera de rango para estas dos estaciones, situándose el rango de medida de sendos instrumentos entre -100 y 100 cm/s. Como se puede observar en las siguientes figuras, los gráficos en los que se representa la velocidad de corriente muestran cierta continuidad y su valor absoluto descende conforme aumenta la profundidad, como era de esperar.

Respecto a los gráficos que representan la dirección de corriente, se observa cómo la dirección dominante se sitúa entre los 200° y 250°, lo cual parece lógico teniendo en cuenta que la línea de costa toma esta misma orientación.

Además, con el objetivo de tener una visión más orientada al tema que nos ocupa, se ha considerado oportuno realizar una transformación de todos los datos disponibles de

velocidades de corriente en el fondo y proyectarlos en el eje Suroeste-Noreste, dirección principal que toman las batimétricas de la plataforma continental en la zona de estudio y que, por tanto, tienden a tomar preferentemente también las corrientes. De esta manera, se han proyectado las velocidades de corriente más profundas disponibles sobre el azimut 45° , tomando valor positivo en caso de orientarse al Noreste y valor negativo si se orientan al Suroeste.

Cabe destacar que, en el caso de las estaciones A1 y A2, los datos de velocidad de corriente más profundos disponibles se encuentran tan sólo 1 metro por encima del lecho marino, lo que hace de estos unos datos bastante fiables a la hora de realizar el posterior análisis. Sin embargo, como se verá más adelante, no se dispone en todos los puntos estudiados de un conjunto de datos de velocidad a una profundidad tan cercana al fondo como sería deseable para realizar un estudio de este tipo. De todas formas, el carácter cualitativo de este estudio nos permite utilizar la mayoría de los datos disponibles, teniendo siempre en cuenta las limitaciones que presenten.

A continuación, se representan los datos finales que serán objeto de posterior análisis.

De la Fig. 23 a la Fig. 28 se muestran el módulo de velocidad y dirección de la corriente a profundidades 3, 13 y 23 metros, para la estación A1. La Fig. 29 muestra la proyección de las velocidades de corriente a profundidad 23 metros sobre el eje SO-NE.

De la Fig. 30 a la Fig. 35 se muestran el módulo de velocidad y dirección de la corriente a profundidades 3, 13 y 23 metros, para la estación A2. La Fig. 36 muestra la proyección de las velocidades de corriente a profundidad 23 metros sobre el eje SO-NE.

Estación A1

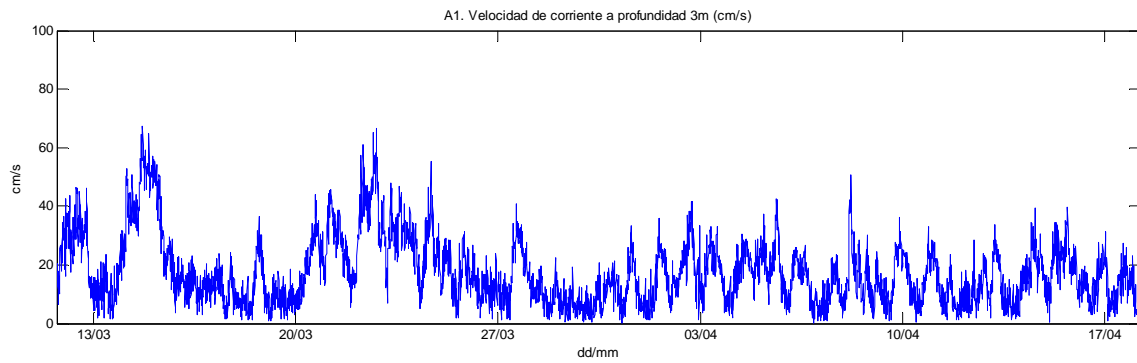


Fig. 23. A1. Velocidad de corriente a profundidad 3 metros.

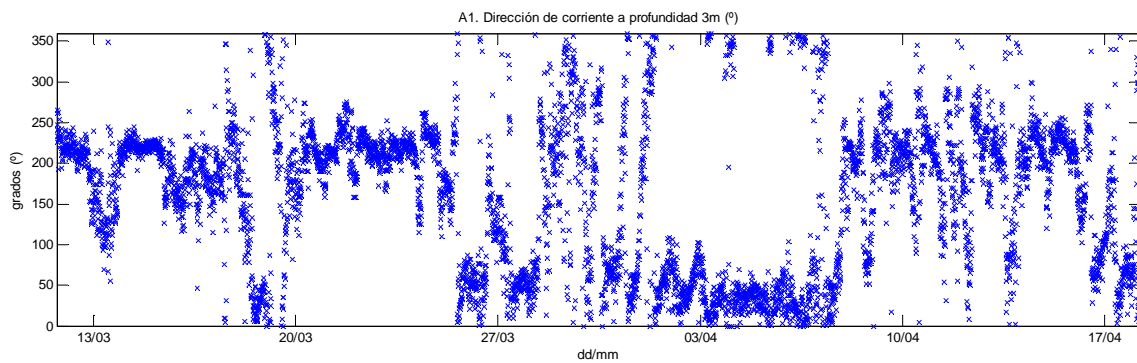


Fig. 24. A1. Dirección de corriente a profundidad 3 metros.

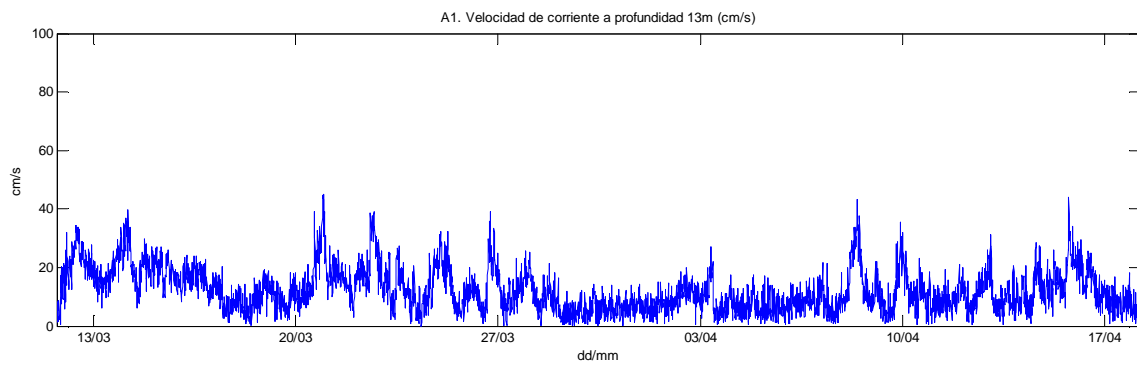


Fig. 25. A1. Velocidad de corriente a profundidad 13 metros.

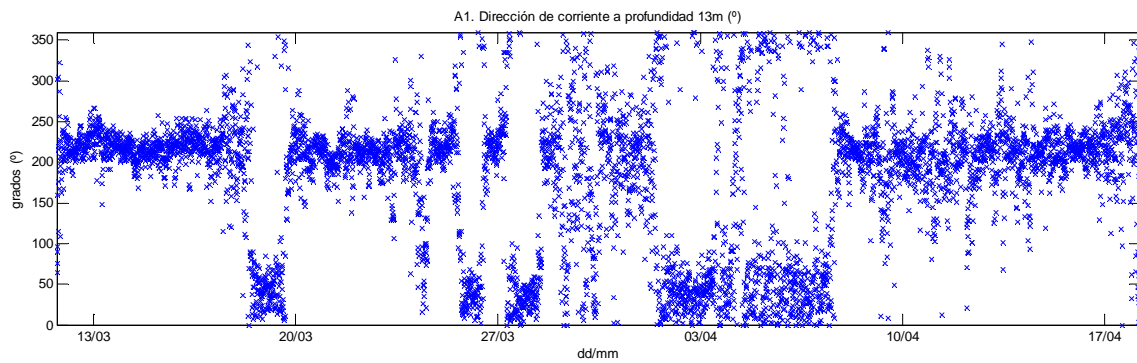


Fig. 26. A1. Dirección de corriente a profundidad 13 metros.

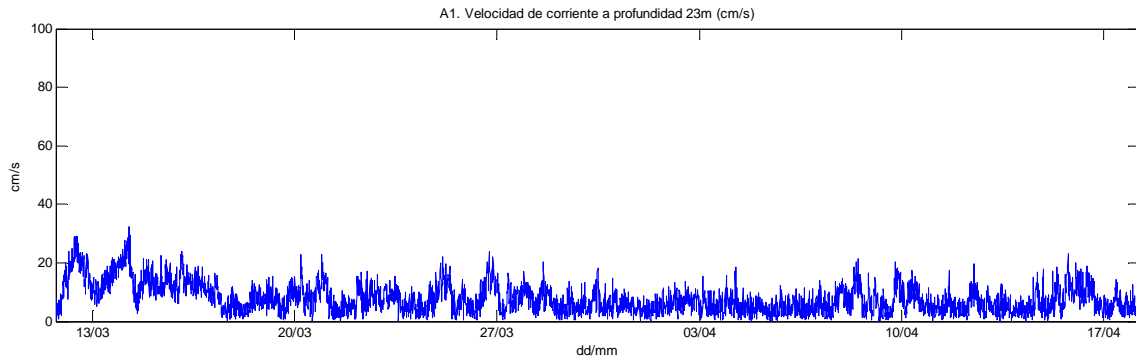


Fig. 27. A1. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros.

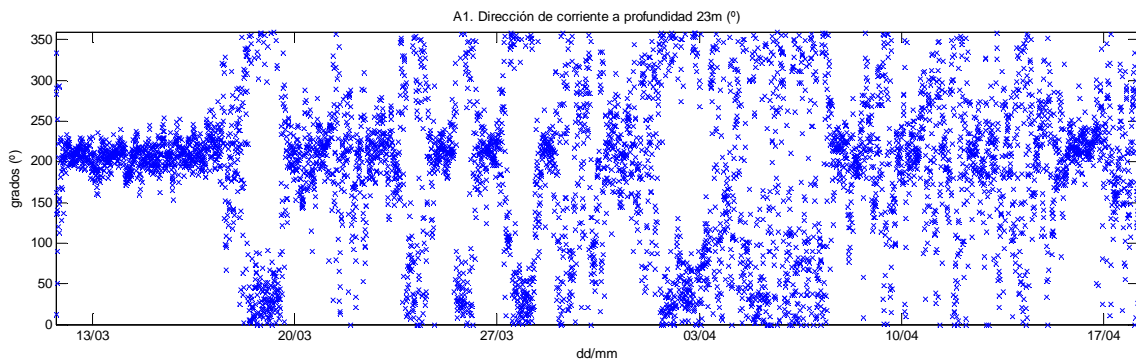


Fig. 28. A1. Dirección de corriente a profundidad 23 metros.

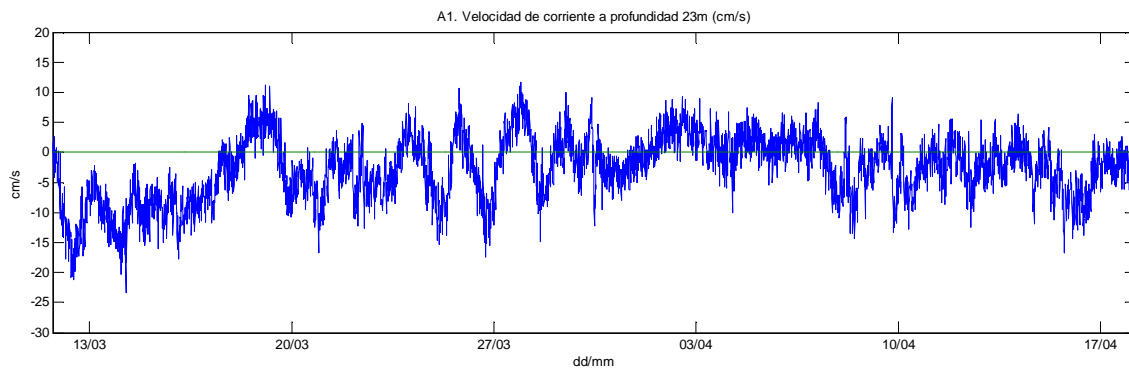


Fig. 29. A1. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

Estación A2

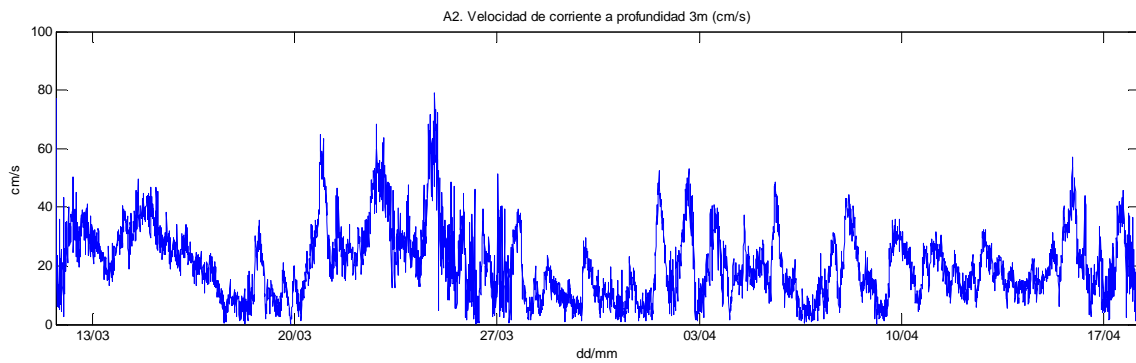


Fig. 30. A2. Velocidad de corriente a profundidad 3 metros.

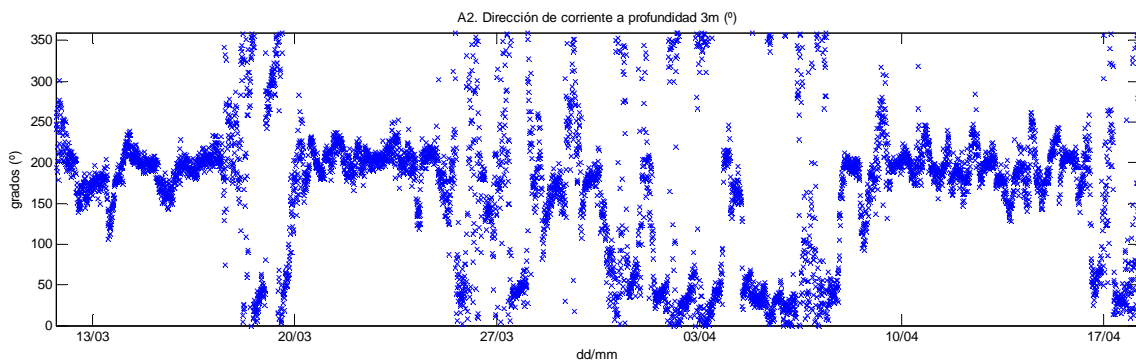


Fig. 31. A2. Dirección de corriente a profundidad 3 metros.

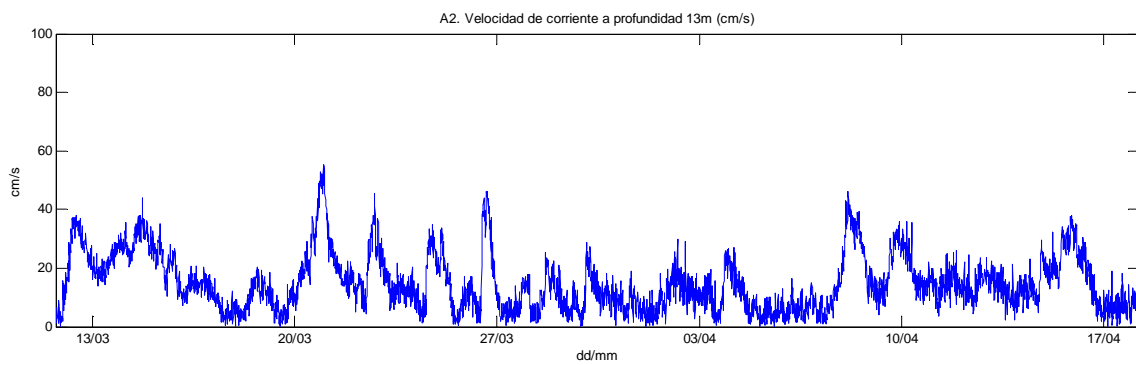


Fig. 32. A2. Velocidad de corriente a profundidad 13 metros.

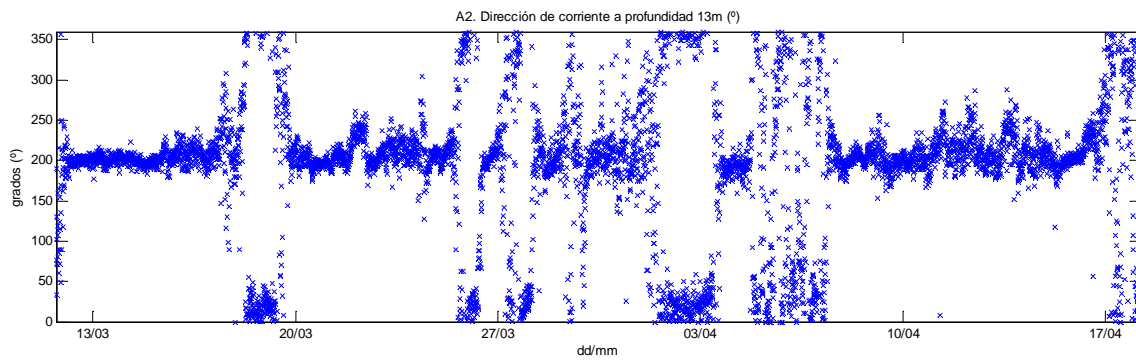


Fig. 33. A2. Dirección de corriente a profundidad 13 metros.

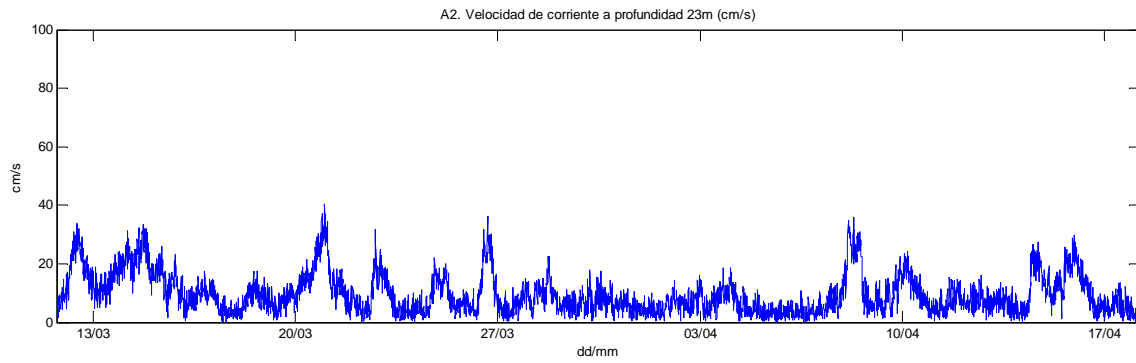


Fig. 34. A2. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros.

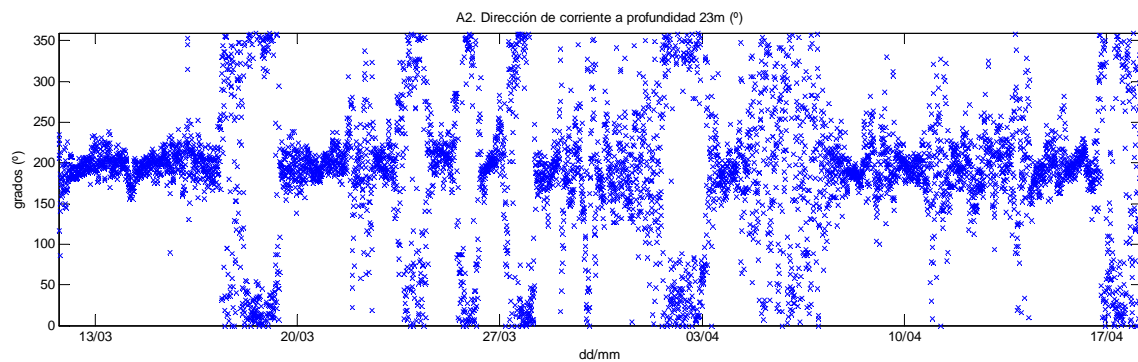


Fig. 35. A2. Dirección de corriente a profundidad 23 metros.

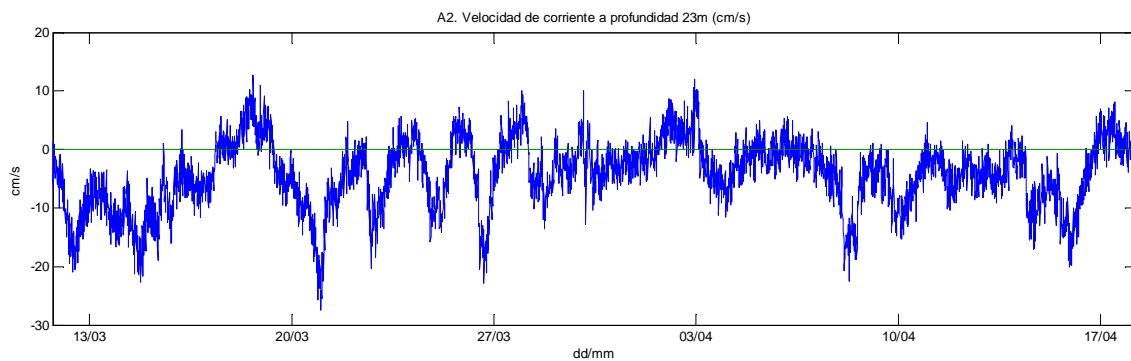


Fig. 36. A2. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

4.3.2. ESTACIÓN A3

En el punto de estudio A3 se ha utilizado un perfilador de corrientes RDI, que dispone de 30 celdas de 2 metros de espesor cada una. La profundidad de fondeo es de 50 metros y la celda más profunda está situada 10 metros por encima del lecho marino. Por tanto, al estar sólo las 20 primeras celdas sumergidas en el agua y sabiendo que la capa número 20 se sitúa en el nivel del mar, dispondremos de datos válidos desde los 40 hasta los 4 metros de profundidad, es decir, desde la capa más profunda (número 1) hasta la capa más superficial y válida (número 19). El número total de datos que se encuentran dentro del período de estudio seleccionado, al proporcionarse mediciones cada 10 minutos, es de 5401 para cada capa.

La capa 20, al igual que pasa en las dos estaciones anteriores con las capas más próximas a la superficie, no se ha tenido en cuenta por las alteraciones que provocan los sonidos externos en las mediciones. De hecho, esta capa abarca desde los 2 metros de profundidad hasta el nivel del mar, de modo que las posibles variaciones puntuales del nivel de la superficie también pueden provocar errores en la toma de datos.

Procediendo de la misma manera que anteriormente, se han seleccionado las mediciones realizadas a 3 profundidades: 40 metros (capa 1), 22 metros (capa 10) y 4 metros (capa 19). Estas mediciones han sido registradas en el mismo formato que en los perfiladores de corriente AWAC de las estaciones A1 y A2, es decir, proporcionando las componentes Este y Norte de velocidad de corriente aunque, en este caso, en unidades de mm/s. Por lo tanto, también se ha procedido a transformar estos datos a términos de módulo de velocidad y dirección (azimut).

Respecto a los posibles errores de medición, tampoco se han detectado valores fuera del rango de medida de este instrumento, que se sitúa entre -200 y 200 cm/s. Los gráficos que dibujan la velocidad y la dirección de corriente se comportan de igual forma que en las estaciones anteriores, es decir, mostrando continuidad y valores menores conforme aumenta la profundidad en el caso de la velocidad, y direcciones dominantes entre los 200° y 250°.

De la misma manera que en las estaciones anteriores, también se ha procedido a proyectar sobre el eje SO-NE las velocidades correspondientes a la capa más profunda disponible, es decir, la que se encuentra 10 metros por encima del fondo marino. El hecho de que las mediciones se encuentren un tanto alejadas del fondo, teniendo en cuenta que el calado en este punto es de 50 metros, se deberá tener en cuenta en el análisis posterior.

Seguidamente, se representan los datos finales obtenidos. De la Fig. 37 a la Fig. 42 se muestran el módulo de velocidad y dirección de la corriente a profundidades 4, 22 y 40 metros, para la estación A3. La Fig. 43 muestra la proyección de las velocidades de corriente a profundidad 40 metros sobre el eje SO-NE.

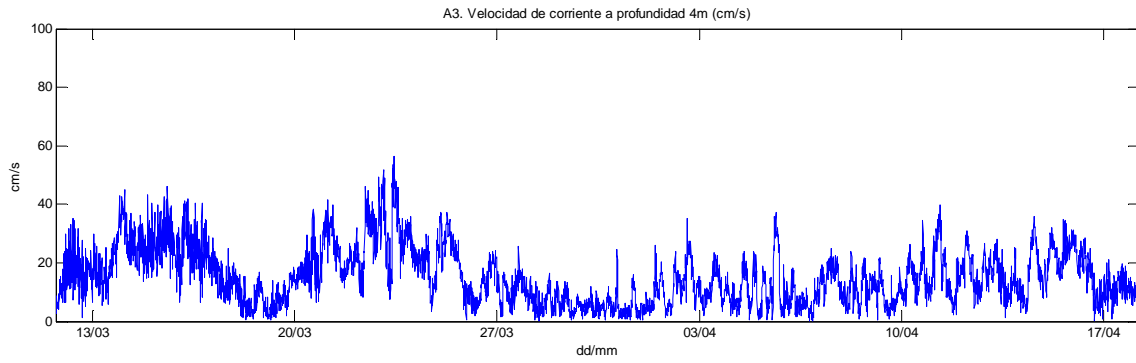


Fig. 37. A3. Velocidad de corriente a profundidad 4 metros.

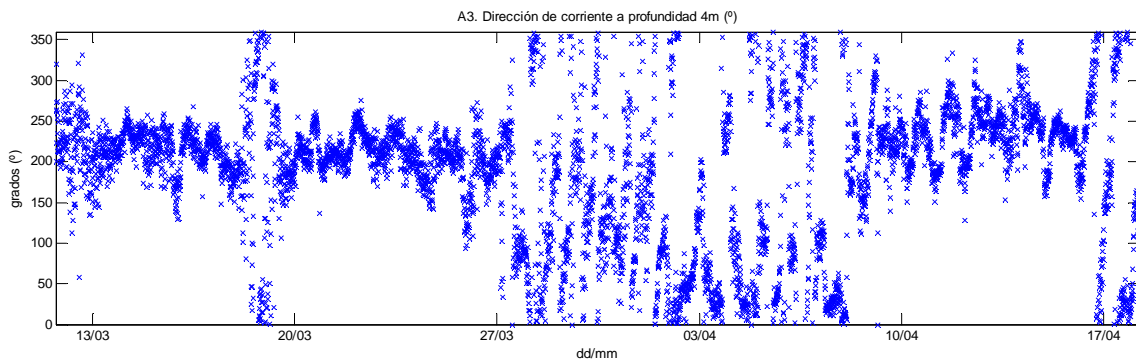


Fig. 38. A3. Dirección de corriente a profundidad 4 metros.

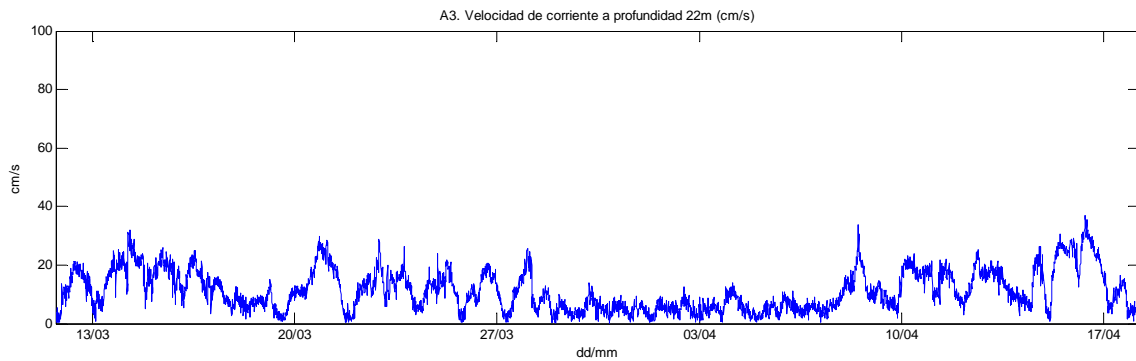


Fig. 39. A3. Velocidad de corriente a profundidad 22 metros.

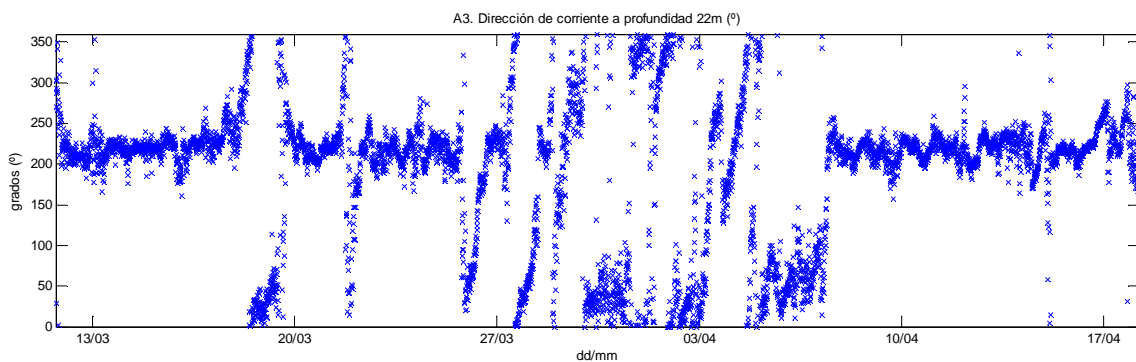


Fig. 40. A3. Dirección de corriente a profundidad 22 metros.

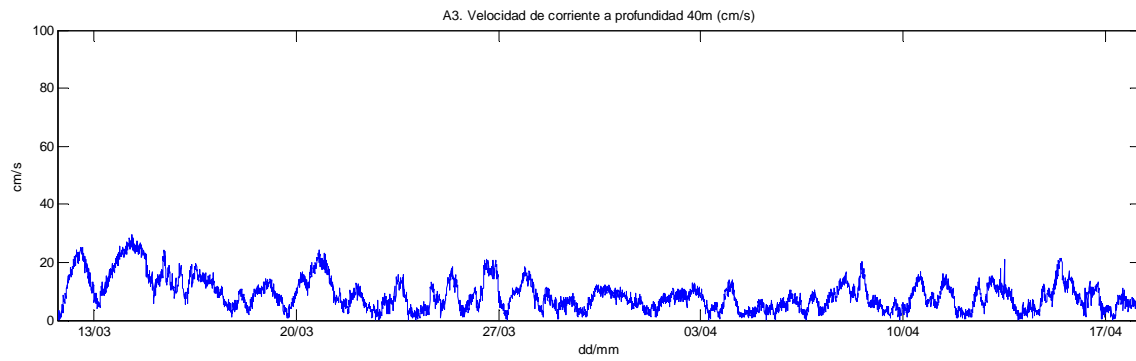


Fig. 41. A3. Velocidad de corriente a profundidad 40 metros.

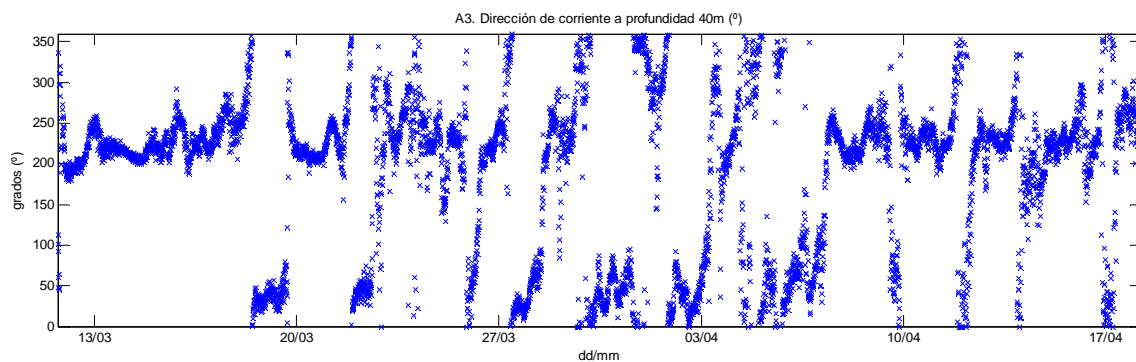


Fig. 42. A3. Dirección de corriente a profundidad 40 metros.

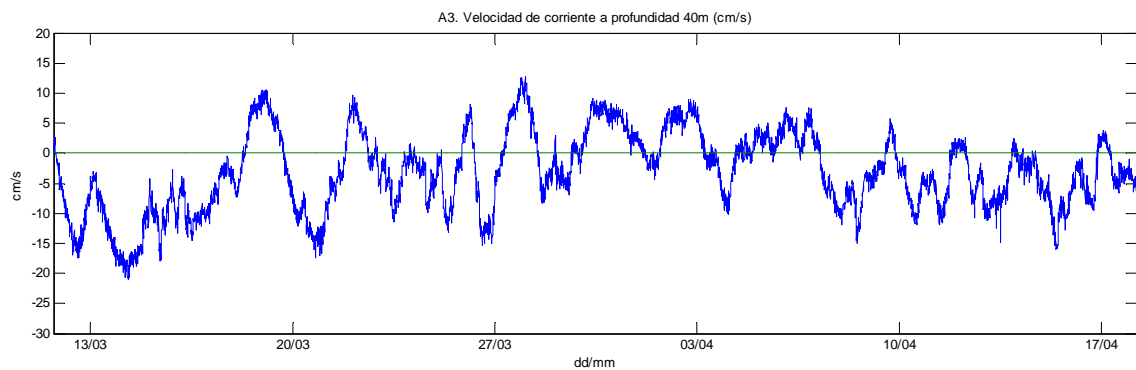


Fig. 43. A3. Velocidad de corriente a profundidad 40 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

4.3.3. ESTACIÓN BADALONA

El perfilador Aquadopp, instalado en la estación Badalona (Pont del Petroli), proporciona mediciones de corriente a la profundidad de 5 metros, existiendo un calado de 12 metros en este punto. En este caso, la toma de datos se produce cada 60 minutos, por lo que se dispone de un número total de datos más reducido, sumando un total de 896 mediciones dentro del período de estudio seleccionado. En dicho período, por causa de algún fallo puntual del aparato o debido a algún error humano a la hora de trasladar los datos a formato telemático, 4 mediciones no aparecen registradas.

Estos datos han sido proporcionados ya en términos de módulo de velocidad y dirección (azimut), en unidades de cm/s y grados sexagesimales respectivamente. Por lo tanto, no ha sido necesario realizar ninguna transformación.

En esta estación, como sucede en las anteriores, tampoco se han detectado valores fuera del rango de medida del instrumento, que en este caso se encuentra entre -100 y 100 cm/s. Se observa normalidad en los gráficos tanto en las velocidades como en las direcciones.

También se ha realizado la correspondiente proyección de las velocidades de corriente disponibles en esta estación sobre el eje SO-NE. Sin embargo, se deberá tener en cuenta que, aunque estas mediciones se encuentren sólo 7 metros por encima del lecho marino, el calado total es de 12 metros, por lo que esta representación no será tan fiable como las realizadas en las anteriores estaciones.

A continuación, se muestran los datos finales de velocidad y dirección de corriente a la profundidad de 5 metros, para la estación Badalona (Figs. 44 y 45). La Fig. 46 muestra la proyección de las mismas velocidades de corriente sobre el eje SO-NE.

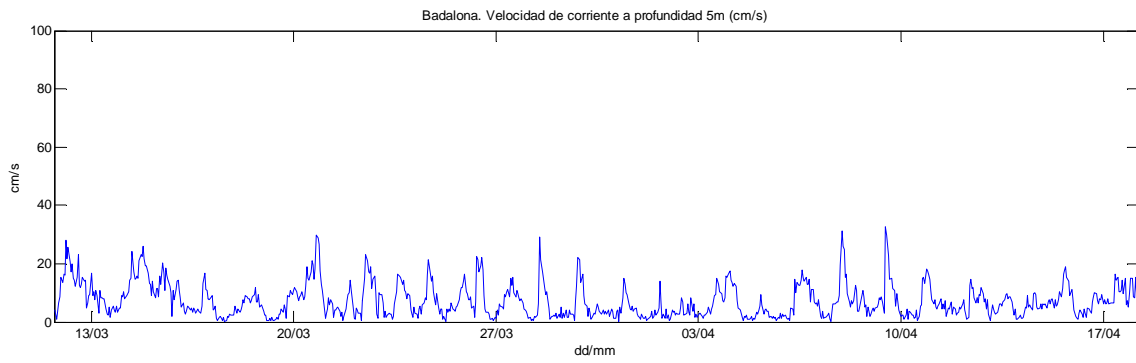


Fig. 44. Badalona. Velocidad de corriente a profundidad 5 metros.

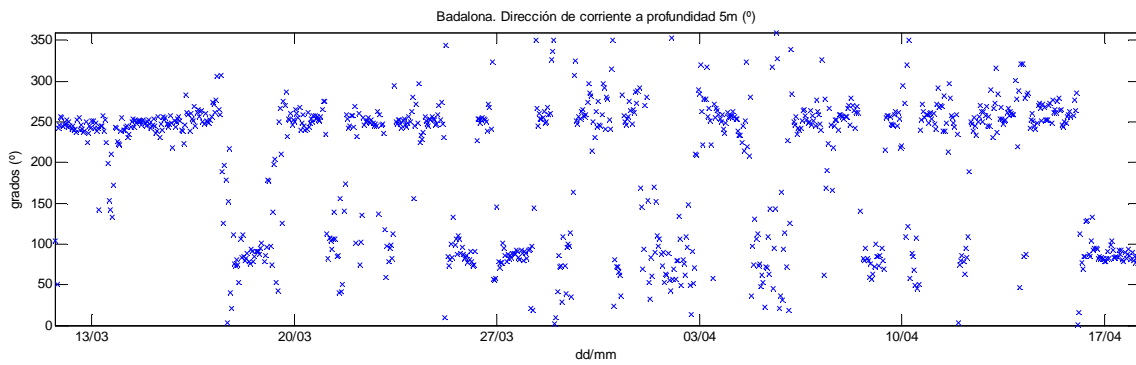


Fig. 45. Badalona. Dirección de corriente a profundidad 5 metros.

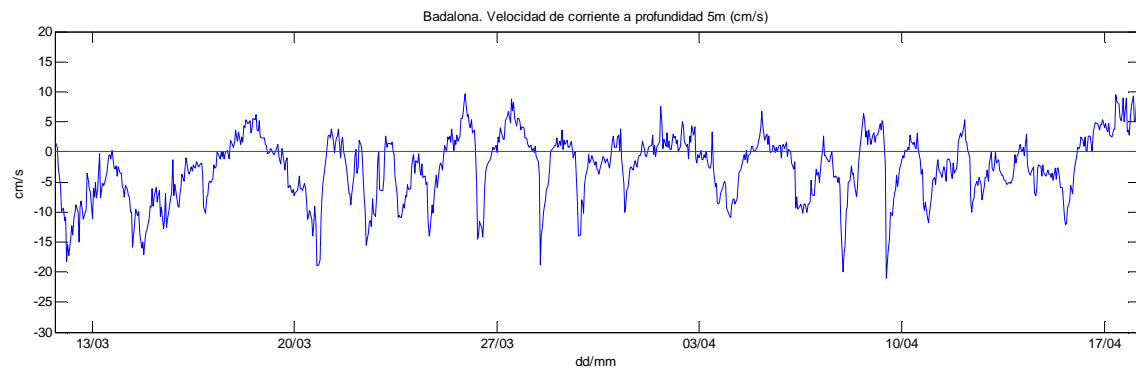


Fig. 46. Badalona. Velocidad de corriente a profundidad 5 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

4.3.4. ESTACIÓN LLOBREGAT

El punto de estudio Llobregat, gracias a la boya AANDERAA 4700 fondeada a 45 metros de profundidad, proporciona mediciones de corriente a dos niveles de profundidad: 1 metro y 15 metros. El número total de datos que se encuentran dentro del período de estudio seleccionado, al proporcionarse mediciones cada 10 minutos, es de 5293 para cada una de las dos profundidades mencionadas. En dicho período, por causa de algún fallo puntual del aparato o debido a algún error humano a la hora de trasladar los datos a formato telemático, 8 mediciones no aparecen registradas.

Estos datos han sido proporcionados ya en términos de módulo de velocidad y dirección (azimut), en unidades de cm/s y grados sexagesimales respectivamente. Por lo tanto, no ha sido necesario realizar ninguna transformación.

En esta estación, como sucede en todas las anteriores, tampoco se han detectado valores fuera de rango. Se observa normalidad en los gráficos tanto en las velocidades como en las direcciones, aunque se debe mencionar que las velocidades obtenidas sí son más altas que en las estaciones anteriores.

En este caso, y en contraposición a las proyecciones de las velocidades de corriente en el fondo sobre el eje SO-NE realizadas para las estaciones anteriores, se ha decidido desestimar la realización de dicha representación. La distancia entre el lecho marino y el punto de medición se eleva a 30 metros, siendo 45 metros el calado total, por lo que no resultaría de utilidad para el estudio posterior.

De la Fig. 47 a la Fig. 50 se muestran los datos finales de velocidad y dirección de corriente a las profundidades de 1 metro primero, y de 15 metros posteriormente, para la estación Llobregat.

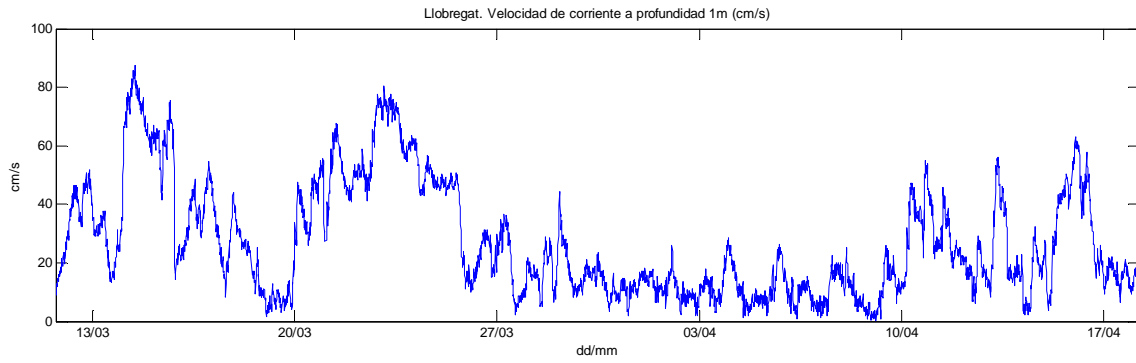


Fig. 47. Llobregat. Velocidad de corriente a profundidad 1 metro.

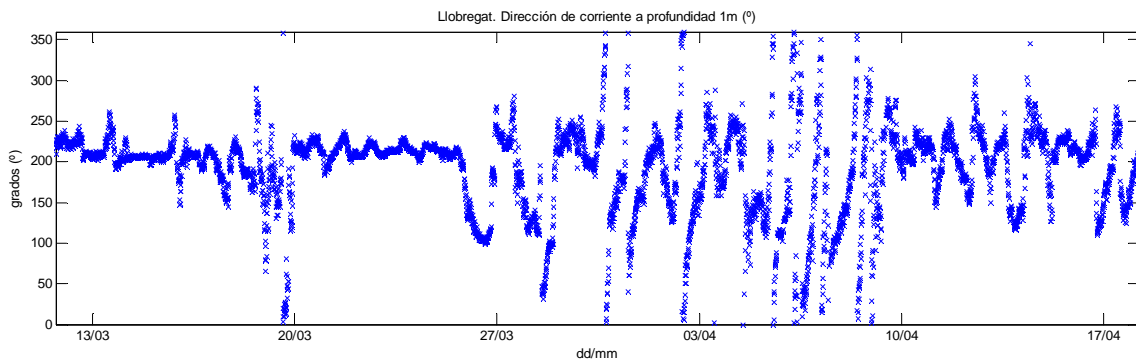


Fig. 48. Llobregat. Dirección de corriente a profundidad 1 metro.

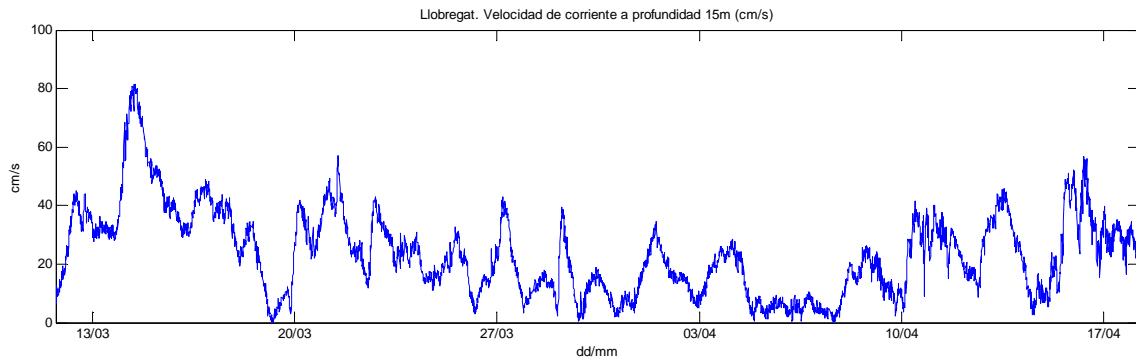


Fig. 49. Llobregat. Velocidad de corriente a profundidad 15 metros.

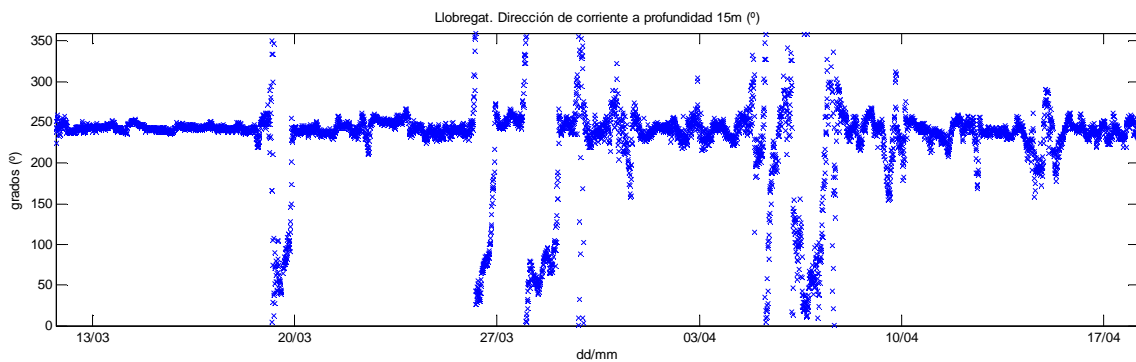


Fig. 50. Llobregat. Dirección de corriente a profundidad 15 metros.

4.4. OLEAJE

En este apartado se realizará el control de calidad de los datos de oleaje direccional de que disponemos. En el caso que nos ocupa, nos interesan únicamente las mediciones de altura de ola significativa (H_s), altura máxima de ola (H_{max}), período de pico (T_p) y dirección del oleaje ($DirTp$). A continuación se mencionan algunos detalles de las series de datos disponibles para cada estación y posteriormente se analizarán las mismas conjuntamente por categorías.

Las estaciones A1 y A2, a través de los AWAC que incorporan, proporcionan también datos de oleaje direccional. Las mediciones realizadas tenían lugar cada 60 minutos, por lo que el número total de datos para cada estación resulta ser de 901 para el período seleccionado. El rango de medida de sendos instrumentos se encuentra entre -15 y 15 metros para las mediciones correspondientes a alturas de ola y entre 0.5 y 100 segundos en el caso de las mediciones de los períodos de oleaje. Todos los valores medidos se encuentran dentro de estos rangos, exceptuando un valor de período de oleaje correspondiente a la estación A2 que será corregido posteriormente (Figs. 64 y 65). No ha habido datos perdidos en estas series.

La boya direccional Datawell G7 fondeada en la estación A3 proporciona datos cada 30 minutos aproximadamente, siendo 1794 el número total de mediciones disponibles para esta estación en el período seleccionado. El rango de medida del instrumento se sitúa entre -20 y 20 metros en el caso de las mediciones de alturas de ola, mientras que en el caso de los períodos de oleaje éste se sitúa entre 1.6 y 30 segundos. Se ha detectado tan sólo un valor medido fuera de estos rangos, correspondiente a la serie de datos de períodos de oleaje y corregido con posterioridad (Figs. 66 y 67). No se percibe la existencia de datos perdidos en esta serie.

La estación de Badalona, a través del perfilador Aquadopp instalado, proporciona también datos de oleaje direccional. Sin embargo, el registro facilitado cuenta con muchos datos de dirección de oleaje ($DirTp$) ausentes, por lo que no se han tenido en cuenta los pocos que podrían ser válidos. Tampoco se proporcionan datos de altura máxima de oleaje (H_{max}) en esta estación. El resto de categorías, altura significativa de ola y período de pico, sí se han analizado, contando con mediciones cada 60 minutos, sumando un total de 900 datos. Existen algunos datos perdidos en la serie de mediciones correspondientes al período de oleaje, así como también algunos valores fuera de rango en la misma serie, aspectos que serán corregidos seguidamente (Figs. 68 y 69).

La boya direccional Datawell Waverider situada en la estación Llobregat proporciona datos cada 60 minutos, siendo 881 el número total de mediciones de oleaje direccional disponibles para el período seleccionado. En este caso sí que se han perdido un total de 19 datos, causado probablemente por algún fallo puntual del aparato o debido a algún error humano en el momento de trasladar los datos a formato telemático. No se han detectado valores fuera de rango para ninguna de las series de datos.

Pasamos a analizar entonces las series de datos para cada categoría.

4.4.1. ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA (H_s)

En la Fig. 51 se muestran los datos sin procesar de altura significativa de ola para la estación A1. Los círculos rojos muestran unas irregularidades puntuales, también conocidas como picos espurios, que tienen lugar únicamente en ese período de tormentas, por lo que se ha procedido a corregirlas mediante la sustitución de todo valor que cumpliera durante ese mismo período la relación $H_s < 0.5$ m , poniendo en su lugar la media del valor anterior y posterior. La Fig. 52 muestra la serie de datos de altura significativa de ola para la estación A1 ya corregida.

El resto de estaciones no presenta ninguna irregularidad en sus series de datos de altura significativa de ola, representadas de la Fig. 53 a la Fig. 56.

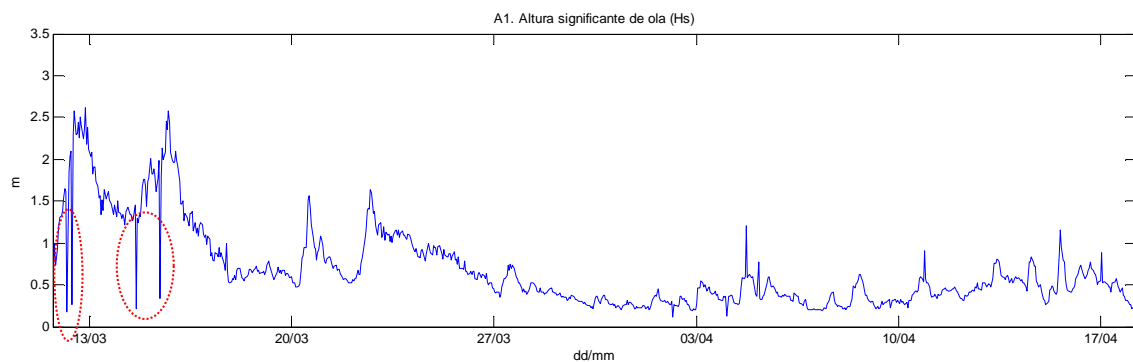


Fig. 51. A1. Altura significativa de ola (H_s). Datos sin procesar.

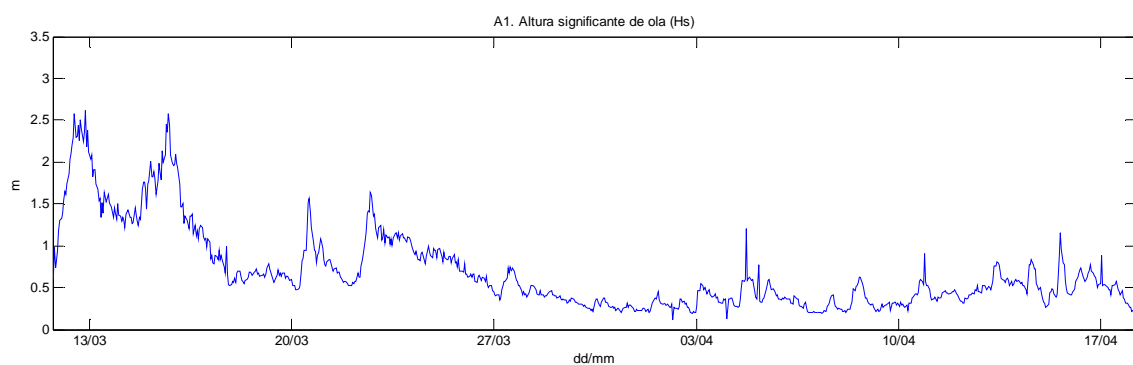


Fig. 52. A1. Altura significativa de ola (H_s).

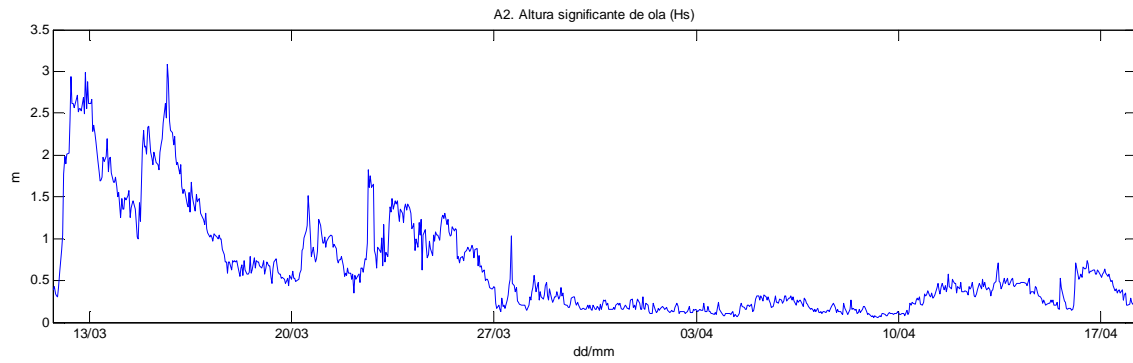


Fig. 53. A2. Altura significativa de ola (Hs).

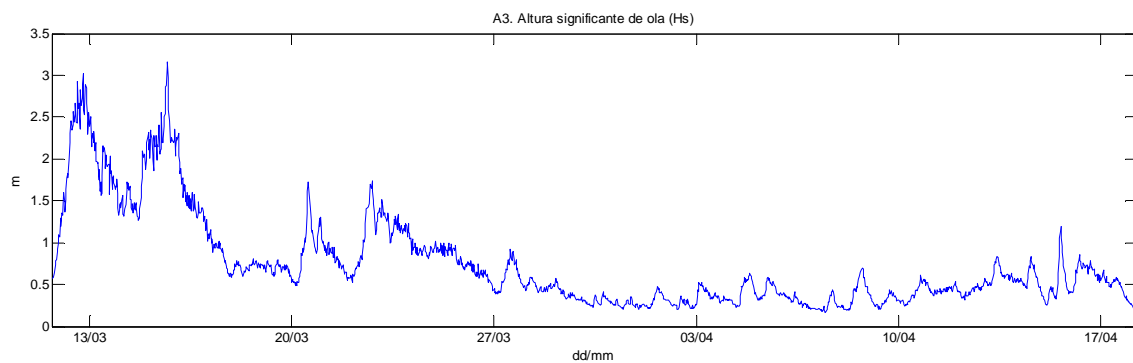


Fig. 54. A3. Altura significativa de ola (Hs).

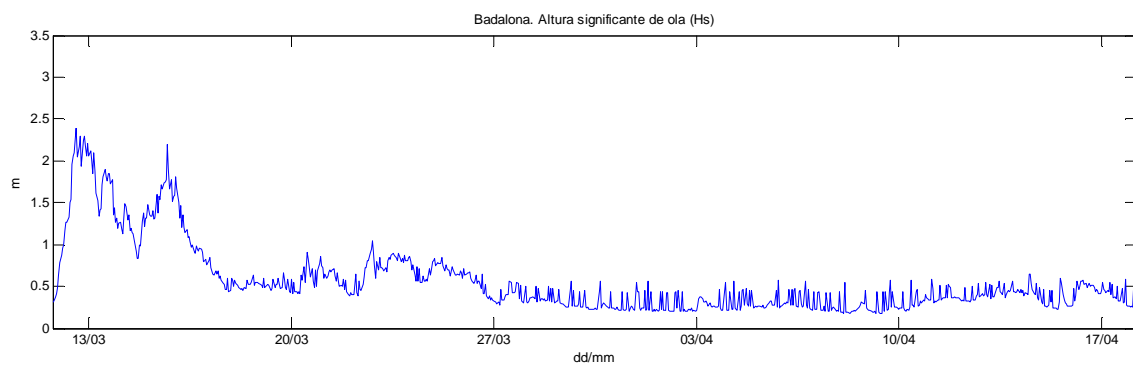


Fig. 55. Badalona. Altura significativa de ola (Hs).

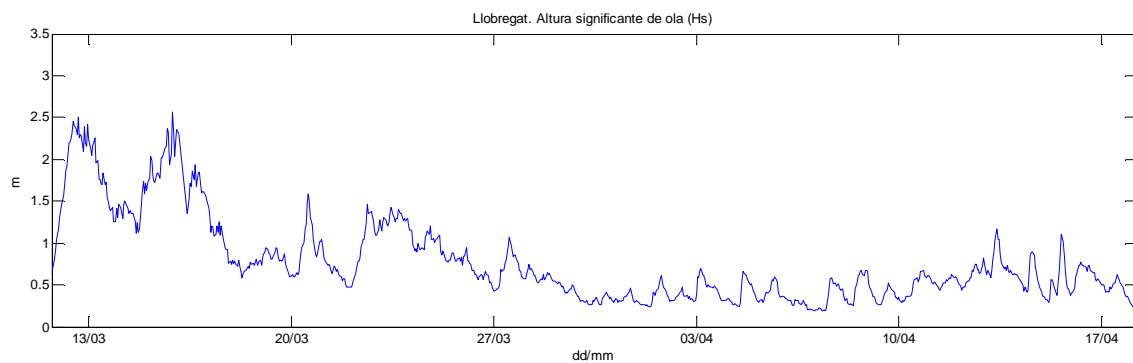


Fig. 56. Llobregat. Altura significativa de ola (Hs).

4.4.2. ALTURA MÁXIMA DE OLA (Hmax)

De la misma manera que sucede en la representación de la altura significativa de ola para la estación A1, en el momento de representar la altura máxima de ola para esta estación observamos el mismo fenómeno relacionado con la aparición de picos espurios (Fig. 57). Por ello, se procede a la sustitución de los valores por debajo del umbral de 0.7 metros en el período más energético inicial, estableciendo el nuevo valor del mismo modo que en el caso anterior, calculando la media de los valores anterior y posterior. En la Fig. 58 se puede apreciar la serie de datos de altura máxima de ola para la estación A1 ya corregida.

El resto de estaciones no presenta ninguna irregularidad en sus series de datos de altura máxima de ola, representadas de la Fig. 59 a la Fig. 61.

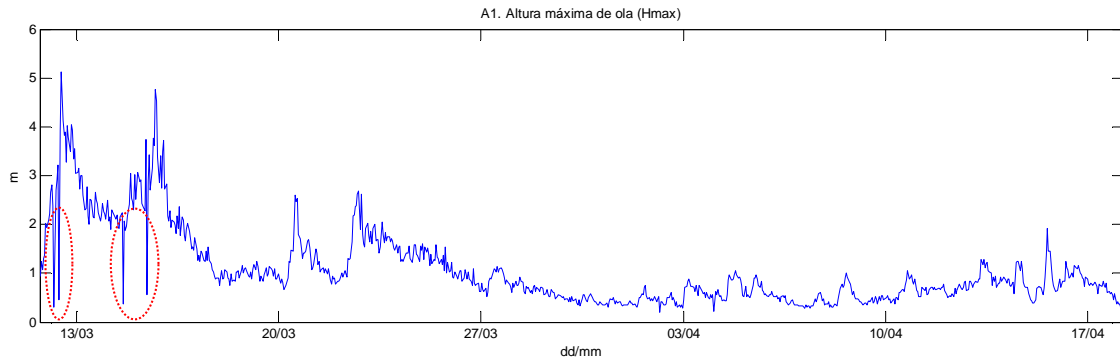


Fig. 57. A1. Altura máxima de ola (Hmax). Datos sin procesar.

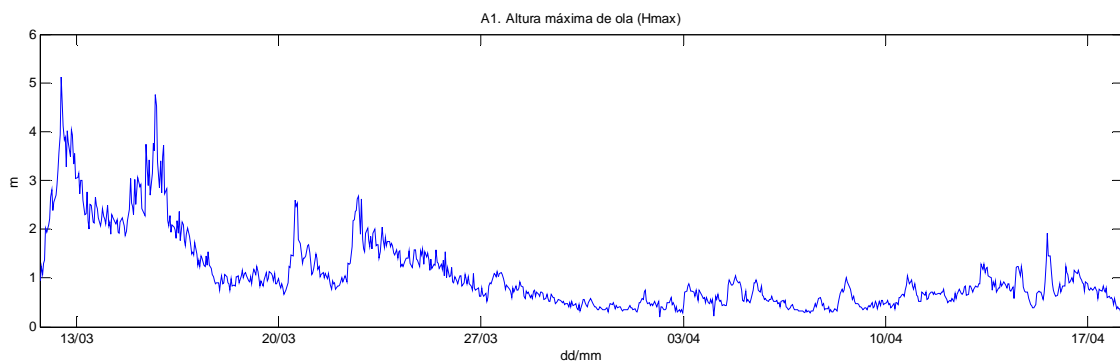


Fig. 58. A1. Altura máxima de ola (Hmax).

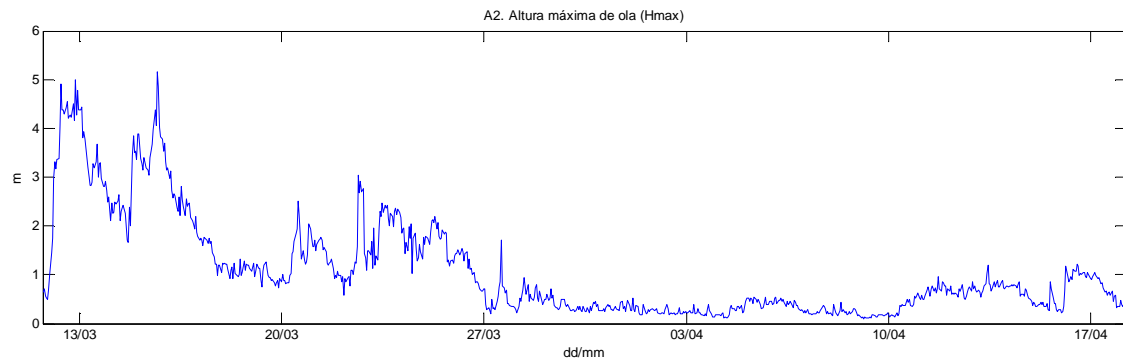


Fig. 59. A2. Altura máxima de ola (Hmax).

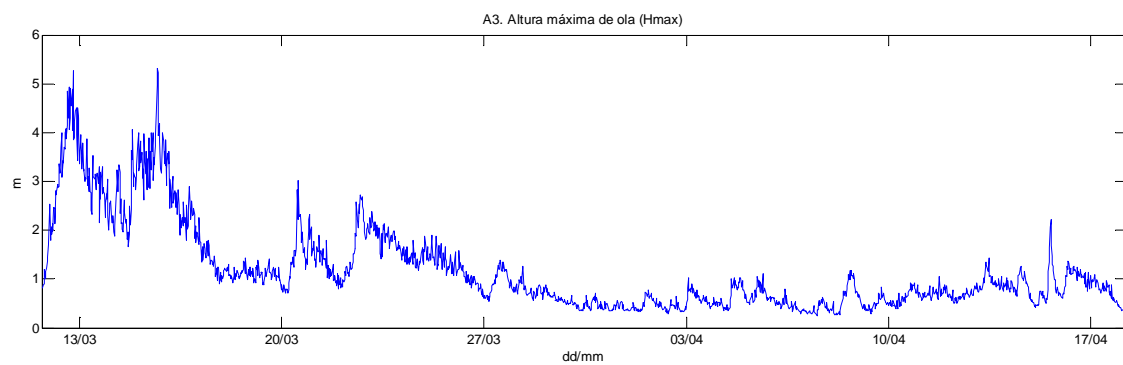


Fig. 60. A3. Altura máxima de ola (Hmax).

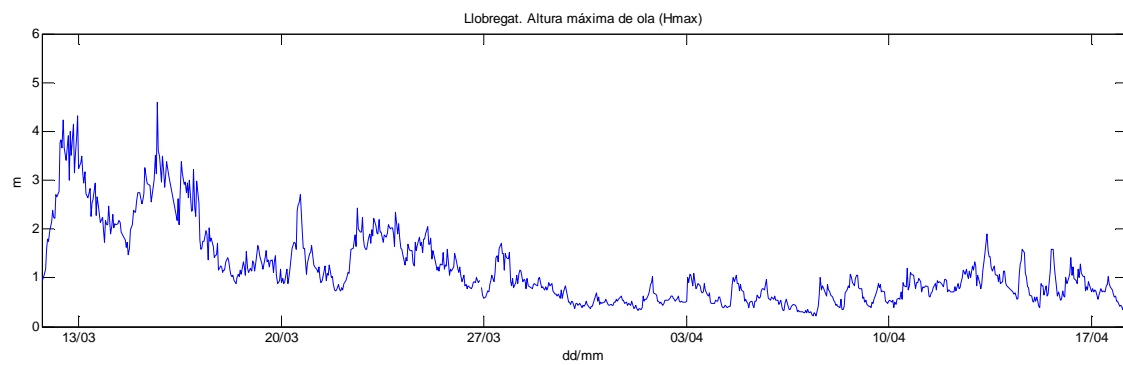


Fig. 61. Llobregat. Altura máxima de ola (Hmax).

4.4.3. PERÍODO DE PICO (T_p)

En la serie de datos correspondiente al período de pico de la estación A1, todos los valores entran dentro del rango de medidas del instrumento. Sin embargo, se observan unas variaciones un tanto extrañas en algunos tramos de la serie (Fig. 62). Por ello, se ha considerado conveniente aplicar una corrección para suavizar esas variaciones. Para cada uno de los 900 valores iniciales (T_i) se ha aplicado la siguiente restricción:

$$T_m^i = \frac{1}{5} \sum_{i-2}^{i+2} (T_i)$$

$$\begin{cases} \text{si } |T_i - T_m^i| > 1.5 \text{ seg} & T_i \equiv T_m^i \\ \text{si } |T_i - T_m^i| \leq 1.5 \text{ seg} & T_i \equiv T_i \end{cases} \quad (2)$$

La Fig. 63 muestra la serie de datos corregida correspondiente al período de pico en la estación A1.

Para la serie de datos de la estación A2 (Fig. 64), ha sido necesaria la corrección del valor fuera de rango que se observa. También se ha aplicado el filtro anterior (2). En la Fig. 65 se muestran los períodos de pico definitivos para la estación A2.

Para la estación A3 se ha corregido el pico espurio fuera de rango que muestra la Fig. 66, aunque también se ha creído conveniente aplicar el mismo filtro que en la estación A1 (2), con el fin de suavizar en la medida de lo posible las variaciones bruscas que presenta. La Fig. 67 muestra la serie de datos de períodos de pico final para la estación A3.

Para la estación Badalona, también se ha aplicado el mismo filtro (2) con el fin de eliminar los dos picos espurios fuera de rango que presenta, rellenar los datos perdidos y suavizar las variaciones bruscas que se observan (Fig. 68). En la Fig. 69 se representan los datos definitivos.

También se ha aplicado el filtro (2) a los datos de período de pico correspondientes a la estación Llobregat representados en la Fig. 70. Los valores finales se muestran en la Fig. 71.

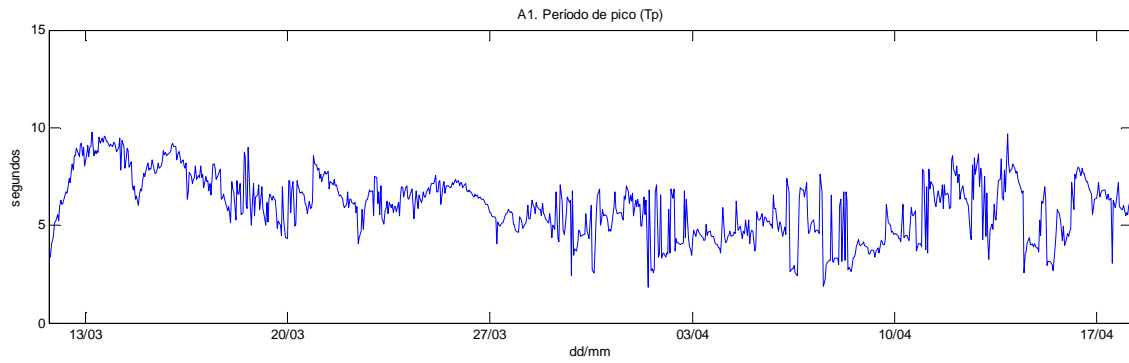


Fig. 62. A1. Período de pico (Tp). Datos sin procesar.

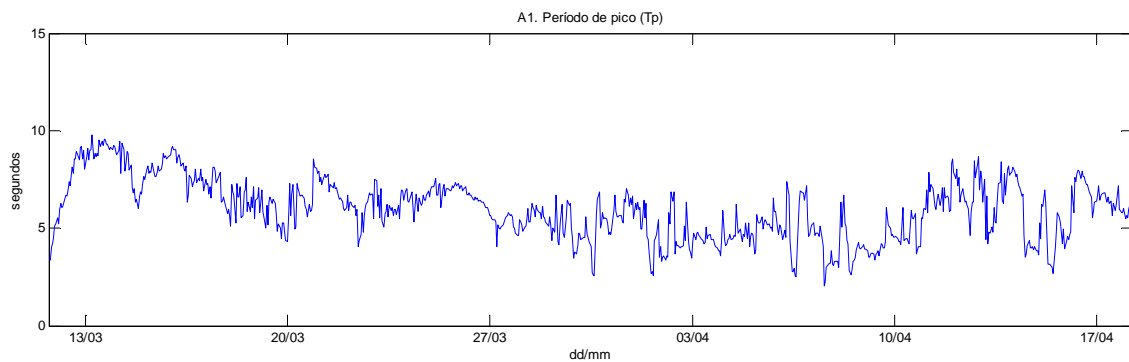


Fig. 63. A1. Período de pico (Tp).

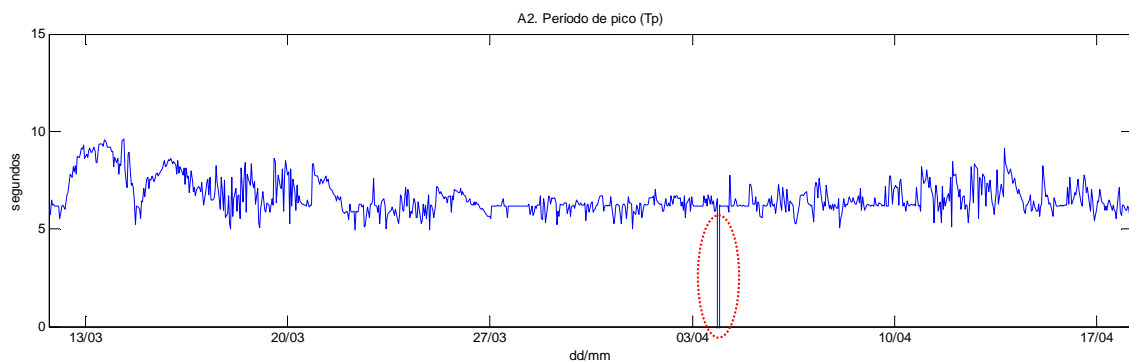


Fig. 64. A2. Período de pico (Tp). Datos sin procesar.

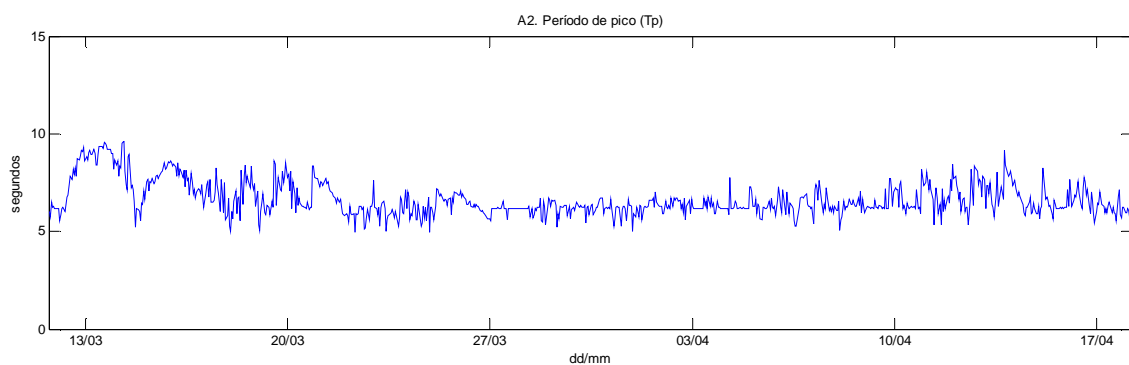


Fig. 65. A2. Período de pico (Tp).

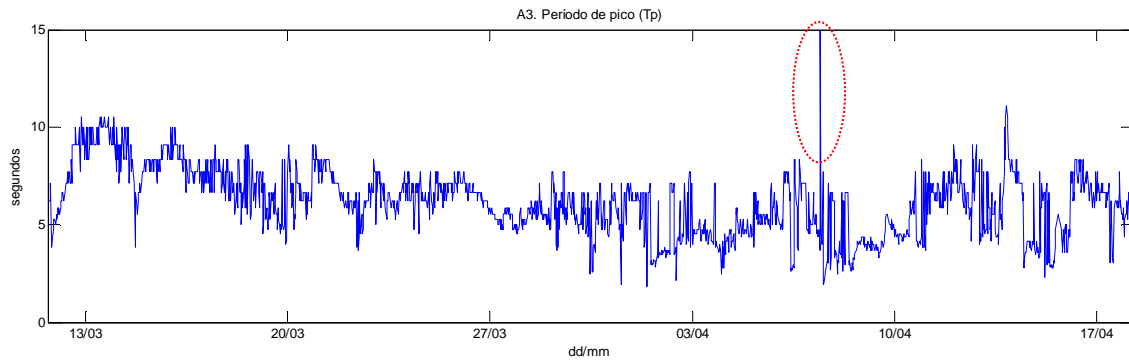


Fig. 66. A3. Período de pico (Tp). Datos sin procesar.

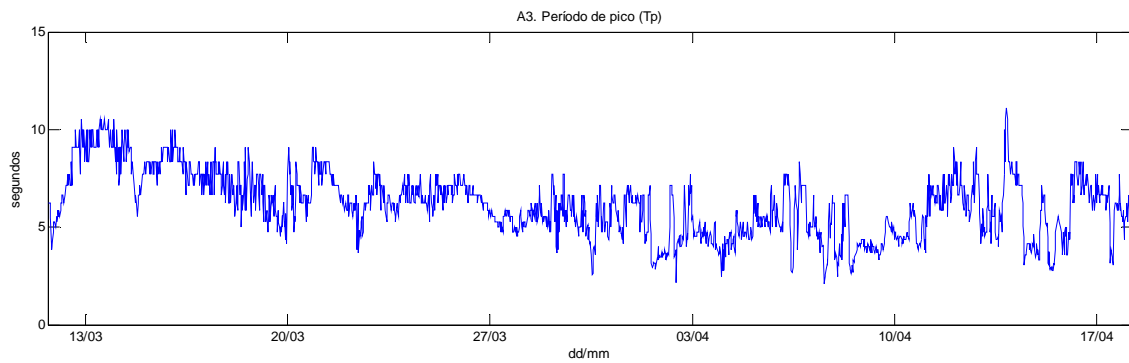


Fig. 67. A3. Período de pico (Tp).

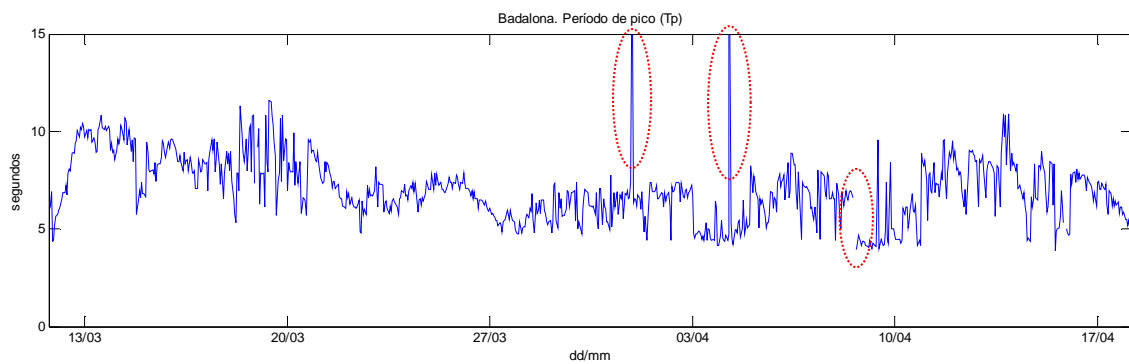


Fig. 68. Badalona. Período de pico (Tp). Datos sin procesar.

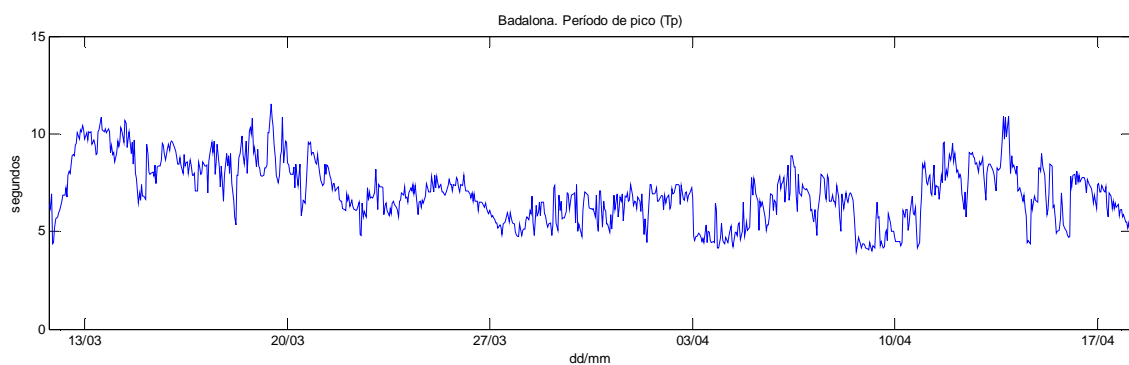


Fig. 69. Badalona. Período de pico (Tp).

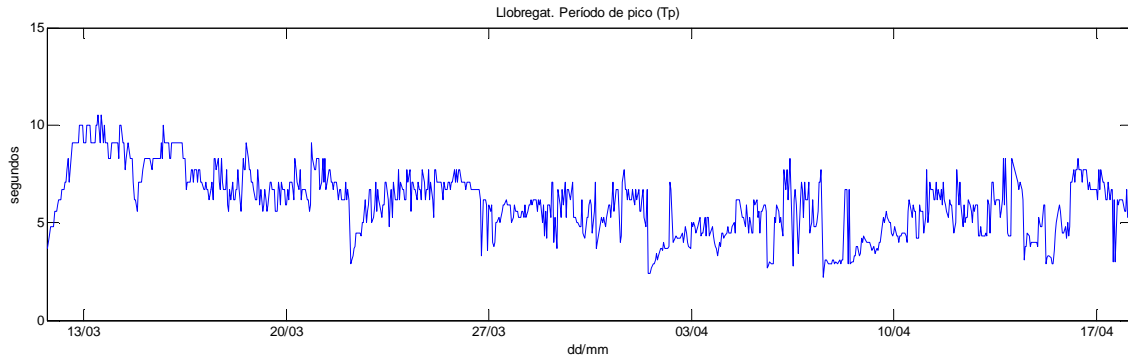


Fig. 70. Llobregat. Período de pico (Tp). Datos sin procesar.

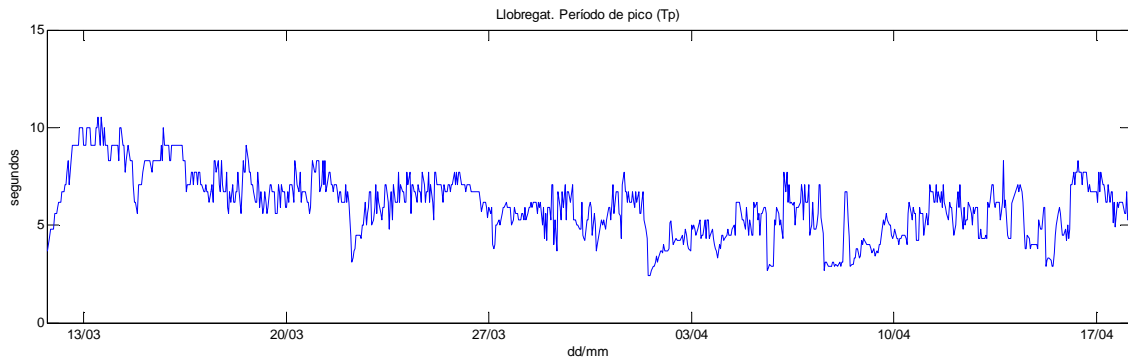


Fig. 71. Llobregat. Período de pico (Tp).

4.4.4. DIRECCIÓN DEL OLAJE (DirTp)

A simple vista, las representaciones que se muestran a continuación, correspondientes a la dirección de oleaje para las estaciones A1, A2, A3 y Llobregat, es decir, de la Fig. 72 a la Fig. 75, no muestran ningún tipo de irregularidad no esperable. Se observa que durante los períodos de tormenta y de transición la dirección del oleaje tiende a ser uniforme, proveniendo predominantemente del Este y del Sur en menor medida, lo cual parece lógico. También parece normal que en períodos de calma, el oleaje no tenga una dirección definida y aparezcan esas variaciones. Por todo ello, no se ha realizado ninguna corrección.

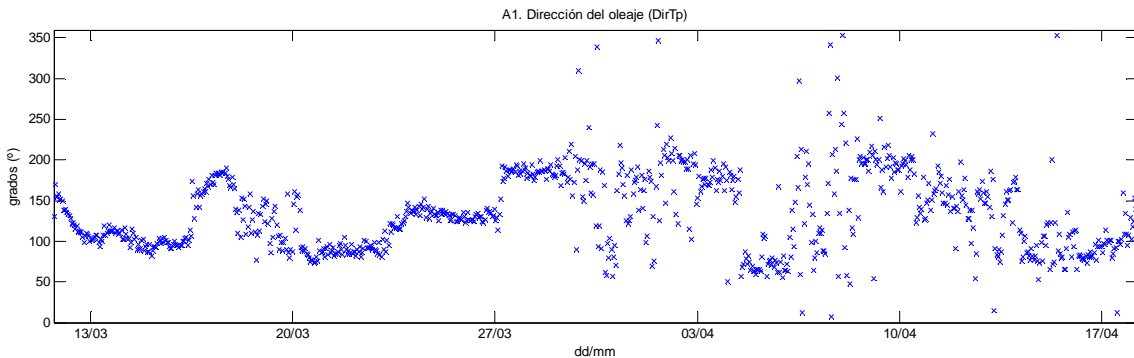


Fig. 72. A1. Dirección del oleaje (DirTp).

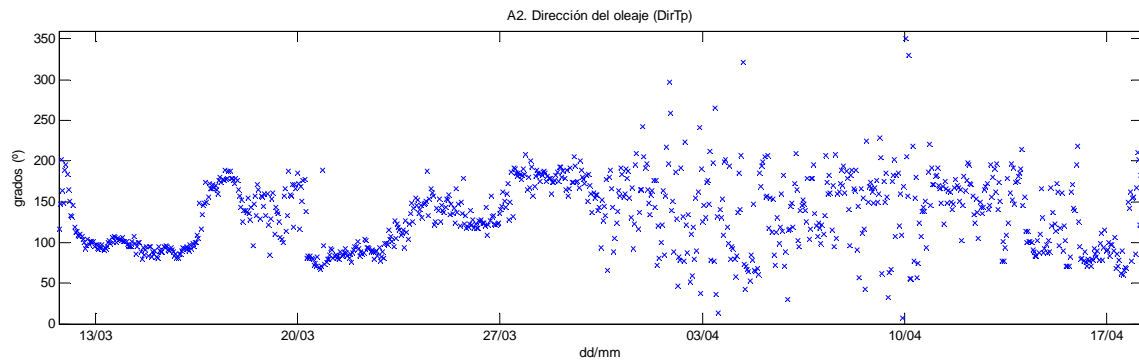


Fig. 73. A2. Dirección del oleaje (DirTp).

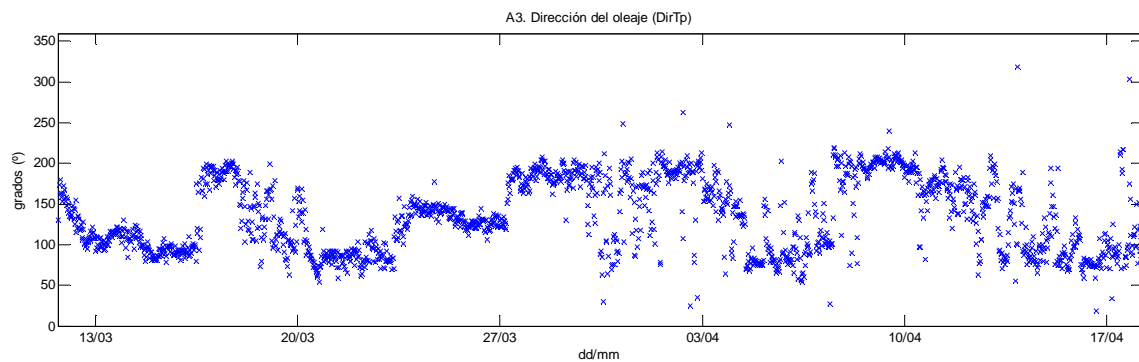


Fig. 74. A3. Dirección del oleaje (DirTp).

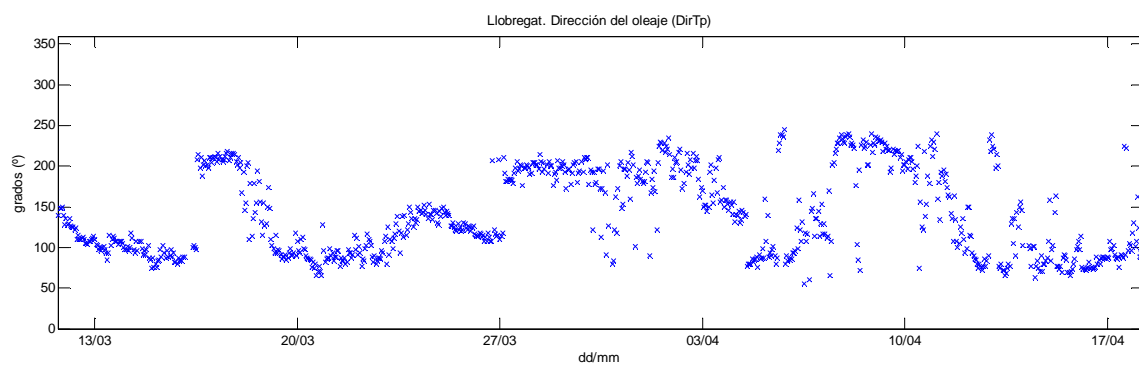


Fig. 75. Llobregat. Dirección del oleaje (DirTp).

4.5. TURBIDEZ

A continuación se detallarán las actuaciones realizadas en los conjuntos de datos correspondientes a la turbidez. Tal y como se ha expuesto con anterioridad, disponemos únicamente de mediciones en las estaciones A1 y A2, gracias a sendos turbidímetros y sensores ópticos de retrodispersión (OBS) instalados en ellas.

La representación de los datos registrados por estos instrumentos sin haber realizado un tratamiento previo de los mismos muestra ciertas alteraciones que deben ser corregidas, tal como muestra a modo de ejemplo la Fig. 76.

Se puede apreciar la aparición continua de picos espurios, producto de diferentes posibles motivos. Como se ha comentado al principio del capítulo, el paso de algún animal u objeto por la trayectoria en la que miden los instrumentos puede explicar este fenómeno. Con el objetivo de obtener un gráfico más “limpio” y suavizado, se ha procedido a aplicar un filtro de media móvil centrada que ha sido adaptado para los requerimientos de cada conjunto de datos. Este filtro muestra la tendencia de una variable en una serie temporal discretizada en un número determinado (n) de períodos de tiempo. En los siguientes apartados se exponen los detalles de esta operación para cada caso.

Otra alteración que se observa es la subida constante en los niveles de turbidez registrados los últimos días, fenómeno producido por el incremento de la suciedad que han ido acumulando los mismos instrumentos. En este caso se ha optado por no realizar ninguna actuación, aunque esta anomalía sí debe ser tomada en cuenta en posteriores análisis. Así pues, durante esos días se considerarán como válidos únicamente los valores relativos que aparezcan después del filtrado.

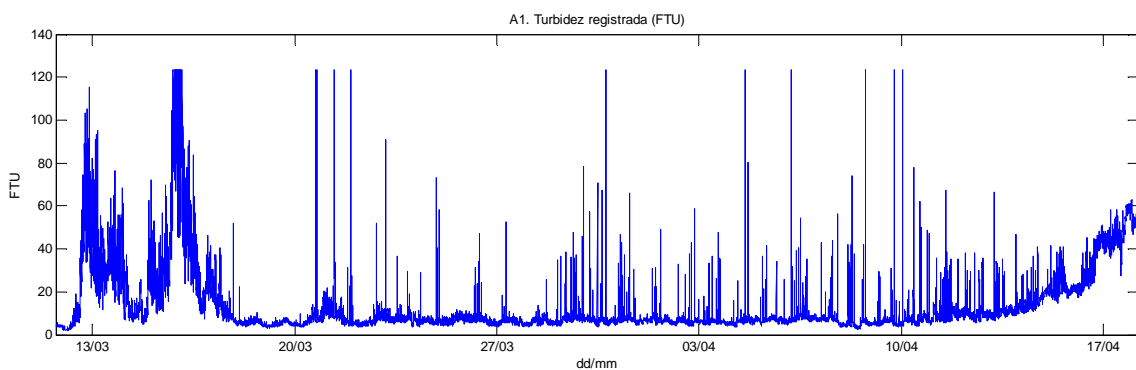


Fig. 76. A1. Turbidez registrada por el turbidímetro. Datos sin procesar.

4.5.1. TURBIDÍMETROS

El número total de datos registrados por los turbidímetros instalados en estas dos estaciones es de 54001 en cada una, realizando una medición por minuto durante el período seleccionado. No se observan valores fuera del rango de medición de los instrumentos, el cual se encuentra entre los valores de 0 y 750 FTU.

Las unidades en las que los turbidímetros registran las mediciones son las unidades de turbidez de la formacina (FTU) y su valoración tendrá un punto de vista meramente cualitativo. Esto se debe a que no se dispone de calibración de estos instrumentos con el fin de relacionar las mediciones realizadas con el tipo de sedimento de la zona, hecho que no permite la transformación de estas unidades a unidades físicas como las de concentración de sedimentos suspendidos (g/L).

El número de intervalos escogido para el filtrado es de 200 para cada una de estas dos series temporales. En la Fig. 76, mostrada con anterioridad, se puede observar la turbidez registrada por el turbidímetro situado en la estación A1, mientras que la Fig. 77 muestra una representación de los mismos datos más suavizada y sin picos espurios tras la aplicación del filtro. De la misma manera, la Fig. 78 muestra los datos sin filtrar para el turbidímetro de la estación A2 y en la Fig. 79 se puede apreciar el efecto del filtrado posterior.

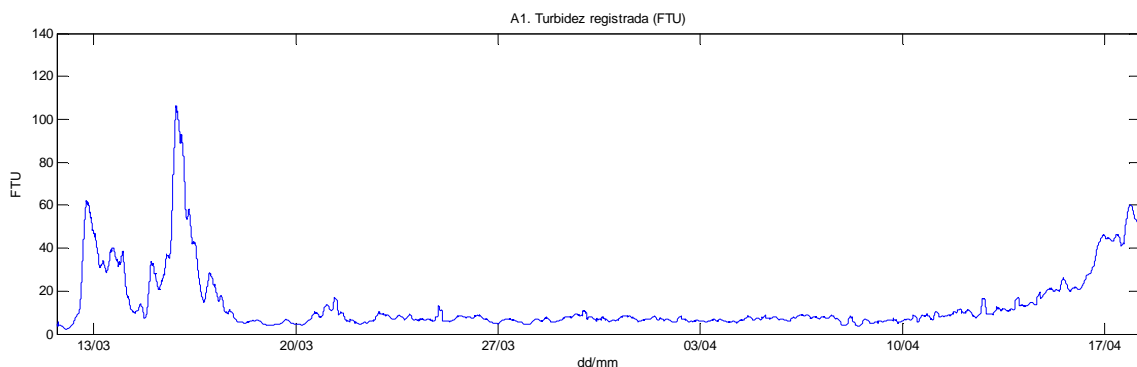


Fig. 77. A1. Turbidez registrada por el turbidímetro. Datos filtrados.

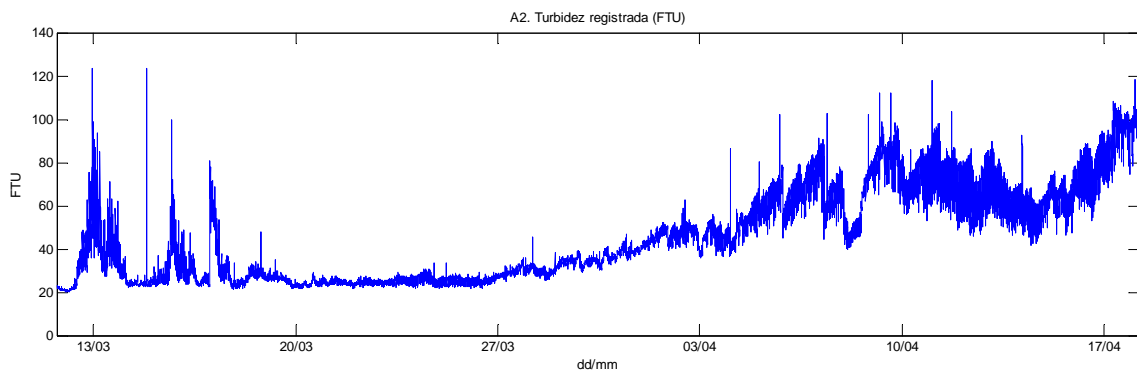


Fig. 78. A2. Turbidez registrada por el turbidímetro. Datos sin procesar.

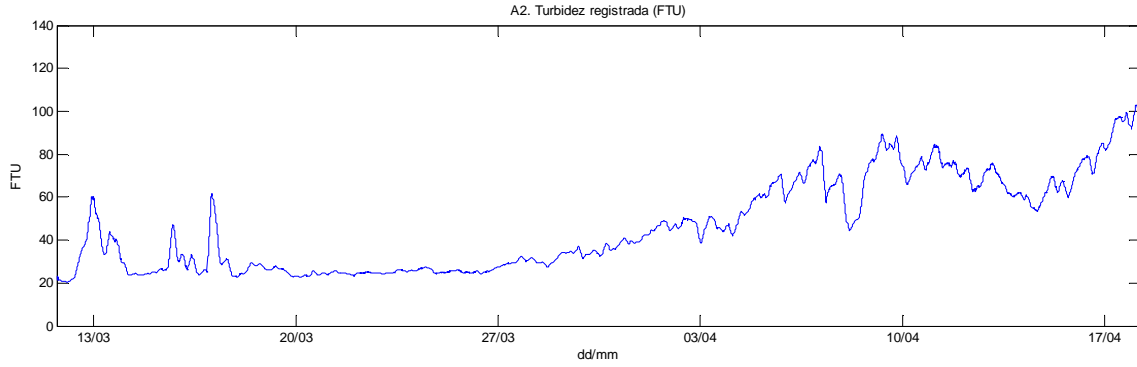


Fig. 79. A2. Turbidez registrada por el turbidímetro. Datos filtrados.

4.5.2. SENSORES ÓPTICOS DE RETRODISPERSIÓN (OBS)

En este caso las mediciones se han realizado cada 10 minutos, por lo que el número total de datos disponible es de 5401 para cada estación. Tampoco se observan valores fuera del rango de medición de los instrumentos, que se halla entre 0 y 4000 NTU.

Los datos proporcionados por los OBS han sido sometidos a una serie de transformaciones que se detallan a continuación, con el fin de llegar a datos físicos de turbidez.

Primeramente, se ha procedido a transformar los datos del canal analógico, que registraba las medidas a través de un contador, a unidades de voltaje (mV). Para ello, se ha utilizado la siguiente expresión:

$$[mV] = [dato] \cdot \frac{5000}{65535} \quad (3)$$

El contador de turbidez de los instrumentos disponía de un total de 65535 valores posibles, correspondiéndose el valor máximo con un voltaje de 5000 mV. De esta relación se obtiene la ecuación (3).

Posteriormente, los datos en unidades de voltaje se han transformado a unidades nefelométricas de turbidez (NTU) a través de las expresiones (4) y (5), que dependen de los coeficientes de calibración de cada instrumento. La ecuación (4) corresponde a la transformación realizada para los datos de la estación A1, mientras que la ecuación (5) corresponde al OBS de la estación A2.

$$[NTU] = 0.032374 + 0.0437783 \cdot [mV] + 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot [mV]^2 \quad (4)$$

$$[NTU] = 0.1115033 + 0.0437436 \cdot [mV] + 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot [mV]^2 \quad (5)$$

A continuación, antes de realizar la transformación de los datos a unidades de concentración de sedimentos en suspensión, se representan estos datos en unidades NTU antes y después de aplicar el filtro de media móvil.

El filtrado se ha realizado utilizando un total de 20 intervalos para cada serie temporal. La Fig. 80 muestra la turbidez registrada por el OBS instalado en la estación A1 en unidades NTU y sin aplicar el filtro, mientras que en la Fig. 81 se muestran los mismos datos con el filtro aplicado. De la misma manera, las Figs. 82 y 83 muestran la turbidez registrada por el OBS de la estación A2 en unidades NTU, antes y después de la aplicación del filtro.

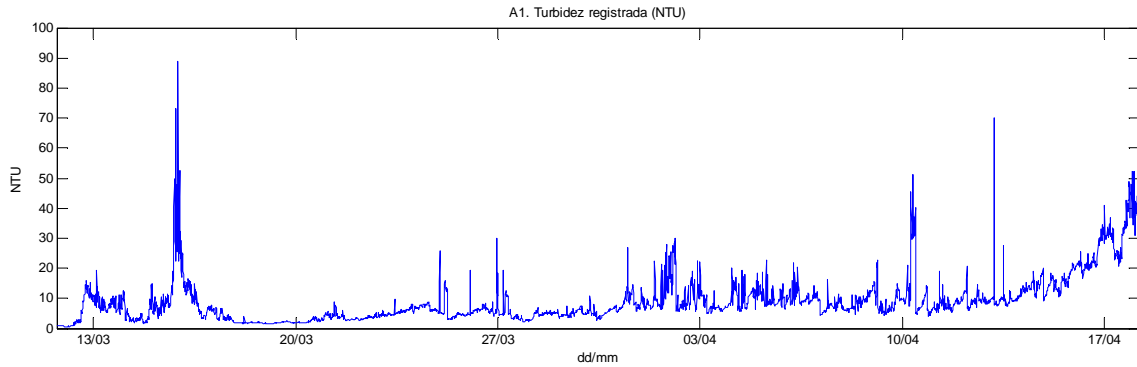


Fig. 80. A1. Turbidez registrada por el OBS. Datos sin procesar.

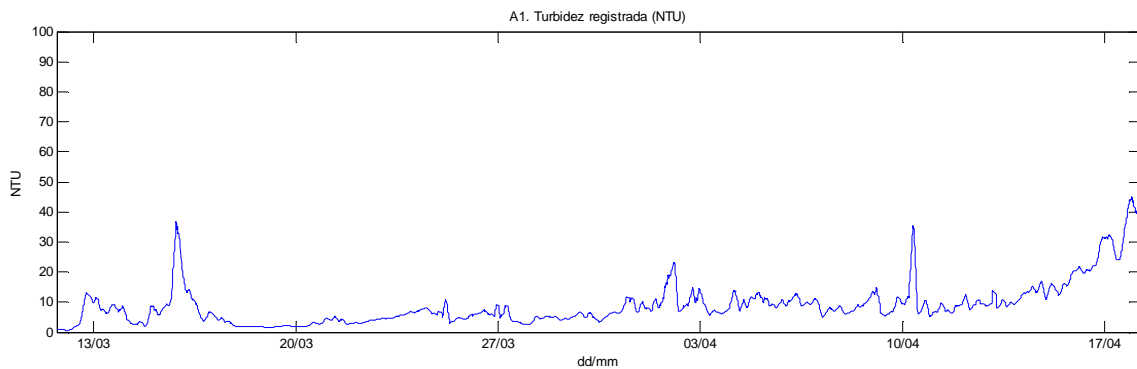


Fig. 81. A1. Turbidez registrada por el OBS. Datos filtrados.

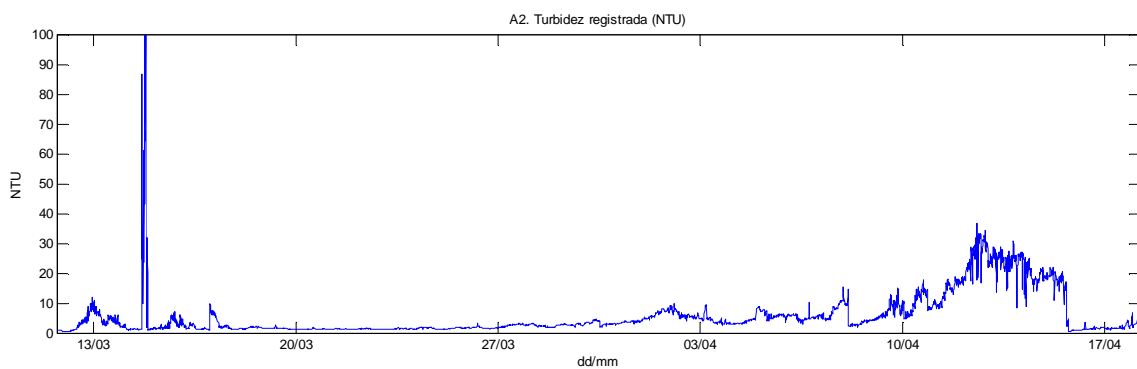


Fig. 82. A2. Turbidez registrada por el OBS. Datos sin procesar.

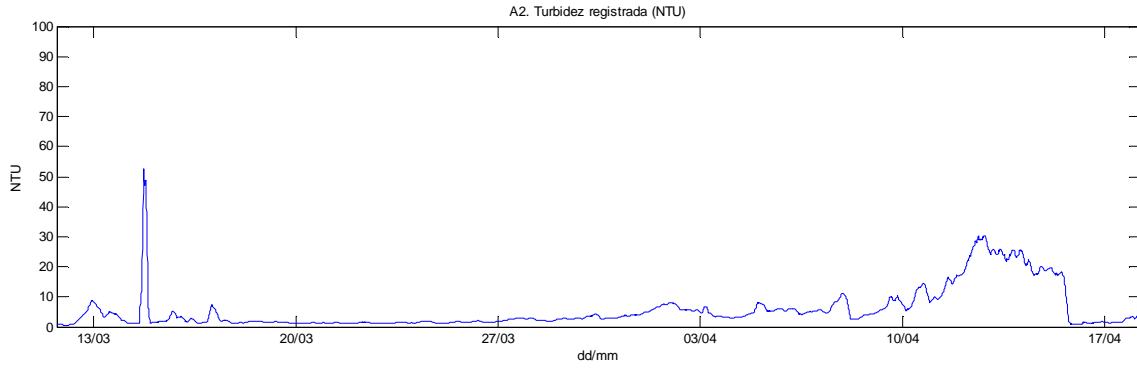


Fig. 83. A2. Turbidez registrada por el OBS. Datos filtrados.

Finalmente, gracias a la calibración de los OBS con el tipo de sedimento de la zona de estudio, también se ha procedido a transformar los datos de voltaje a concentración de sedimentos en suspensión. Estas calibraciones consisten en medir, para cada uno de los OBS, valores de turbidez en unidades de voltaje (V) para diferentes grados de concentración conocida de sedimento en suspensión (g/L). Para ello se calibran primero por separado glicerol y agua, para hallar la correlación de voltajes medidos de ambos líquidos, tal como muestra la Fig. 84, obteniendo la expresión (6).

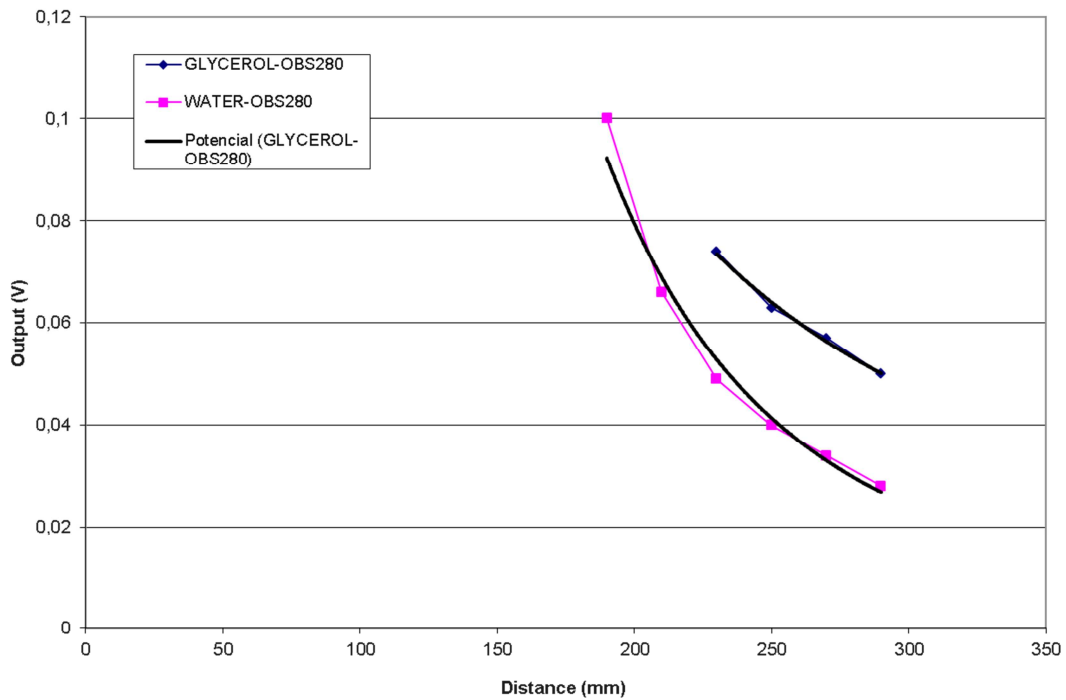


Fig. 84. Calibración de la turbidez del agua y del glicerol.

$$V_{agua} = 6688.3 \cdot \left(\frac{V_{glicerol}}{4201.9} \right)^{\frac{2.103}{1.8885}} \quad (6)$$

Seguidamente, utilizando una muestra de arena de cada una de las zonas, previamente secadas en horno, se procede al calibrado de los OBS midiendo valores de turbidez en unidades de voltaje sobre un recipiente que contiene glicerol y la cantidad conocida de arena que se va introduciendo. De esta manera, se obtiene la relación entre turbidez medida y valores reales de concentración de sedimentos en suspensión en glicerol. Para obtener los valores de turbidez en unidades de voltaje de estas concentraciones en agua se aplica a los valores encontrados la expresión (6) deducida anteriormente.

Una vez representados los valores de turbidez en unidades de voltaje y las concentraciones de sedimentos en suspensión correspondientes, se realiza un ajuste lineal con el que finaliza este proceso de calibración (Figs. 85 y 86), obteniendo las expresiones buscadas (7) y (8).

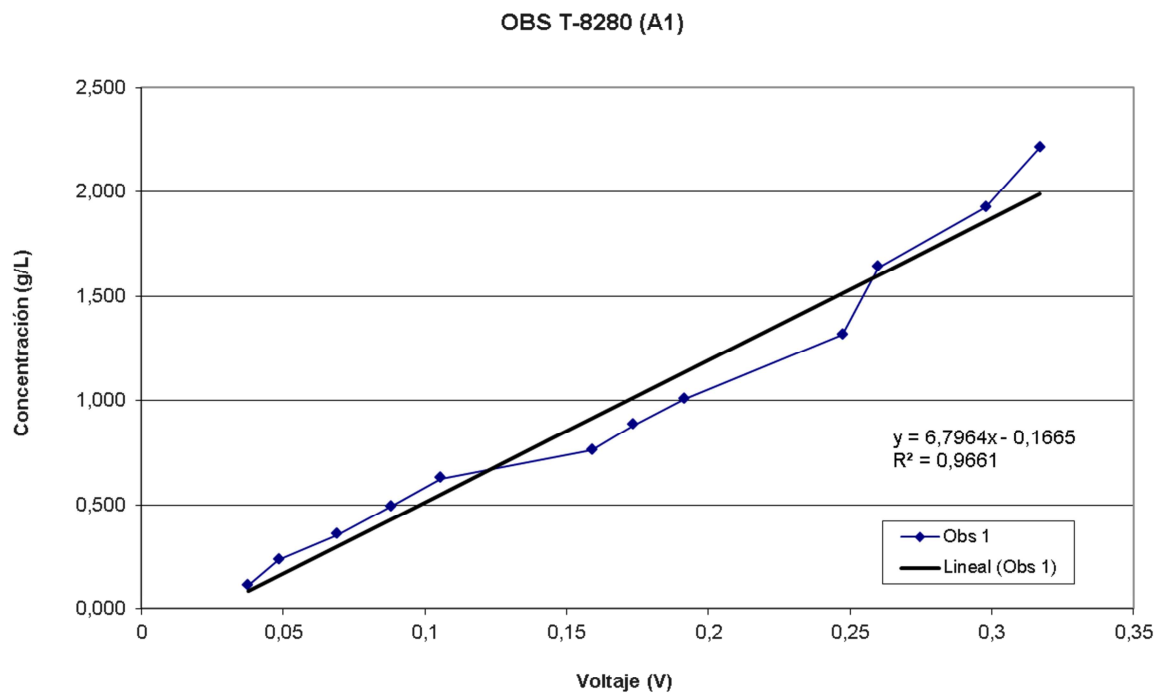


Fig. 85. A1. Calibración del OBS.

$$[g/L] = 6.7964 \cdot [V] - 0.1665 \quad (7)$$

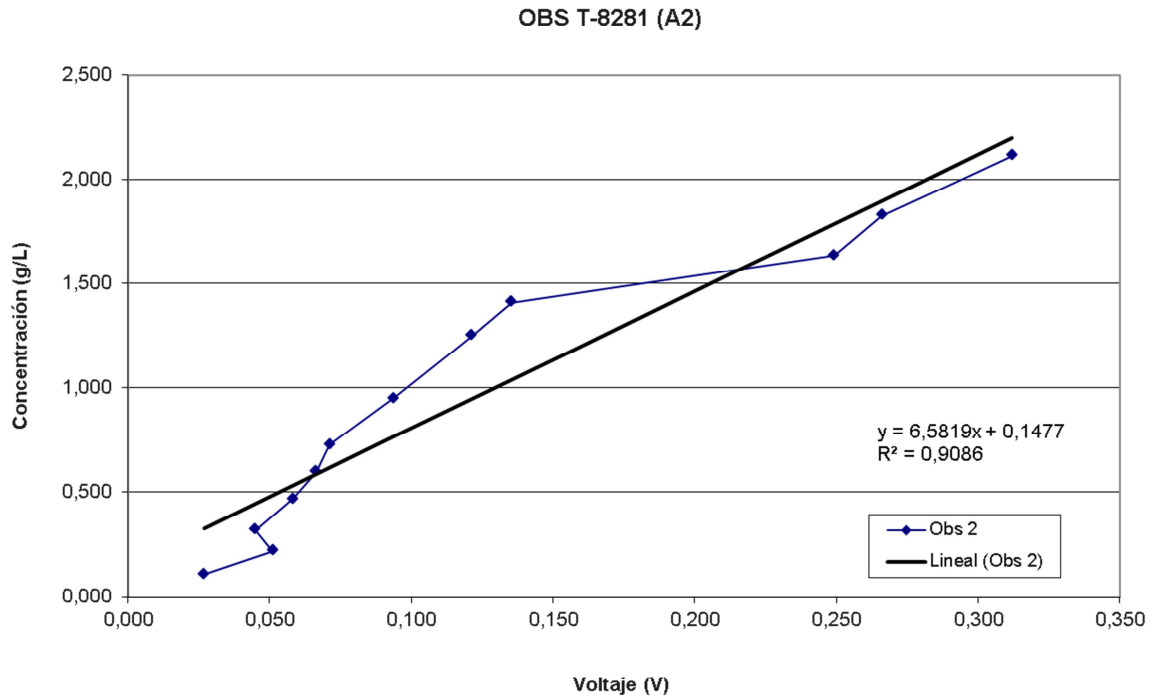


Fig. 86. A2. Calibración del OBS.

$$[g/L] = 6.5819 \cdot [V] + 0.1477 \quad (8)$$

De esta manera, utilizando las expresiones (7) y (8) y aplicando el mismo filtro que se ha utilizado anteriormente para la representación en unidades NTU, es posible representar la concentración de sedimentos en suspensión (g/L) medida en las estaciones A1 y A2, tal como se muestra en las Figs. 87 y 88.

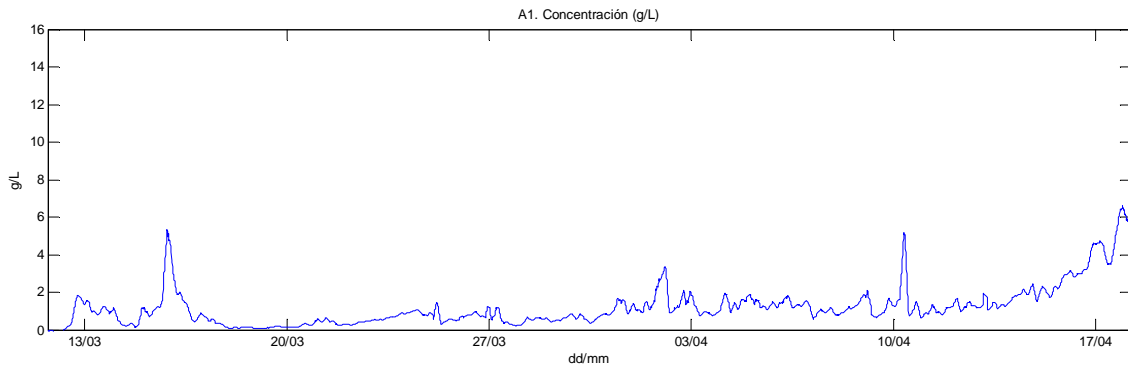


Fig. 87. A1. Concentración de sedimentos en suspensión. Datos filtrados.

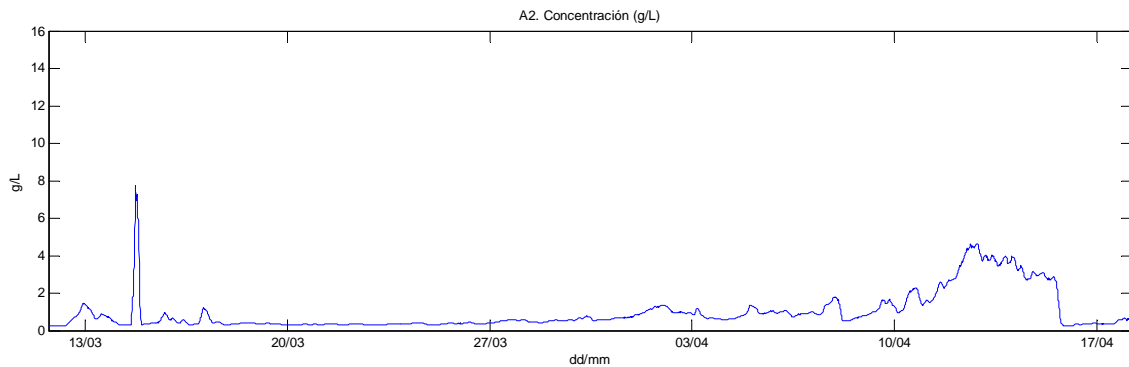


Fig. 88. A2. Concentración de sedimentos en suspensión. Datos filtrados.

4.6. METEOROLOGÍA

En este apartado se presentan los datos de meteorología disponibles, gracias a la estación meteorológica de Badalona y a los sensores de la boya AANDERAA fondeada en la estación Llobregat.

4.6.1. ESTACIÓN BADALONA

La estación meteorológica instalada en este punto proporciona datos de velocidad de ráfaga del viento (Fig. 89), velocidad media del viento (Fig. 90), dirección media del viento (de dónde sopla) (Fig. 91), presión atmosférica (Fig. 92) y precipitación (Fig. 93). Debido a que la estación registra datos cada 10 minutos, se dispone de un total de 5401 datos por categoría en el período que se desea estudiar. No ha sido necesario aplicar ningún tipo de corrección para estos conjuntos de datos.

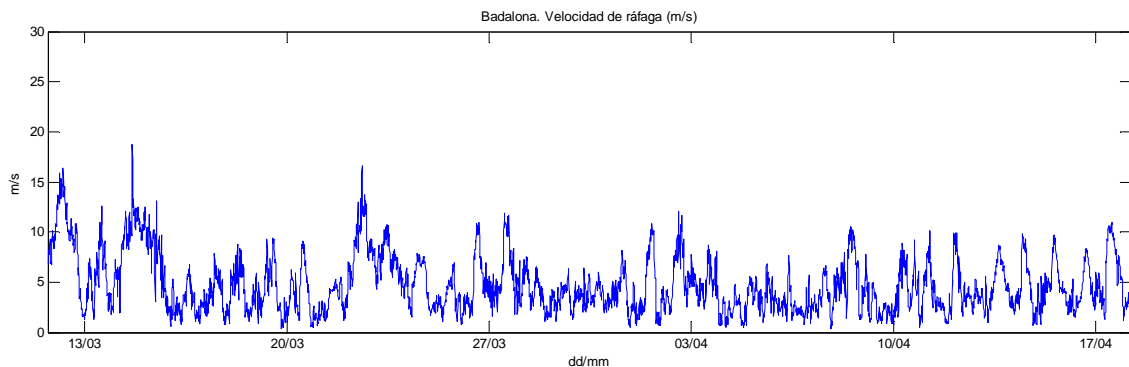


Fig. 89. Badalona. Velocidad de ráfaga del viento.

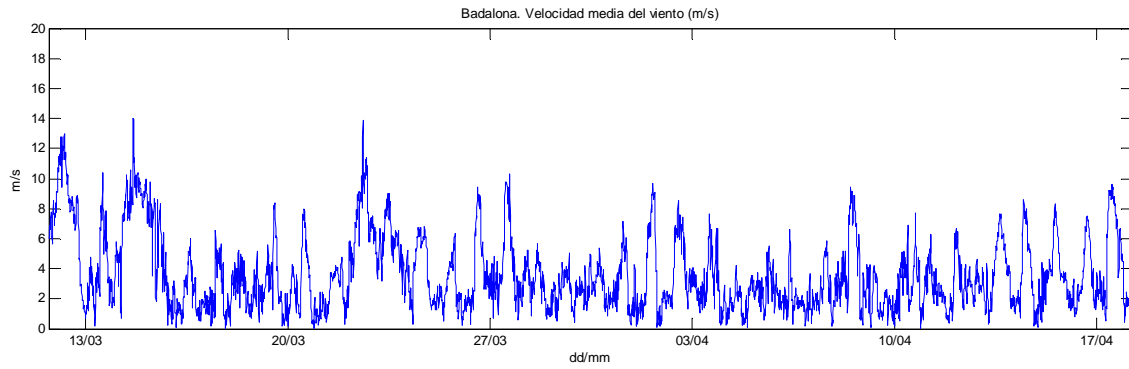


Fig. 90. Badalona. Velocidad media del viento.

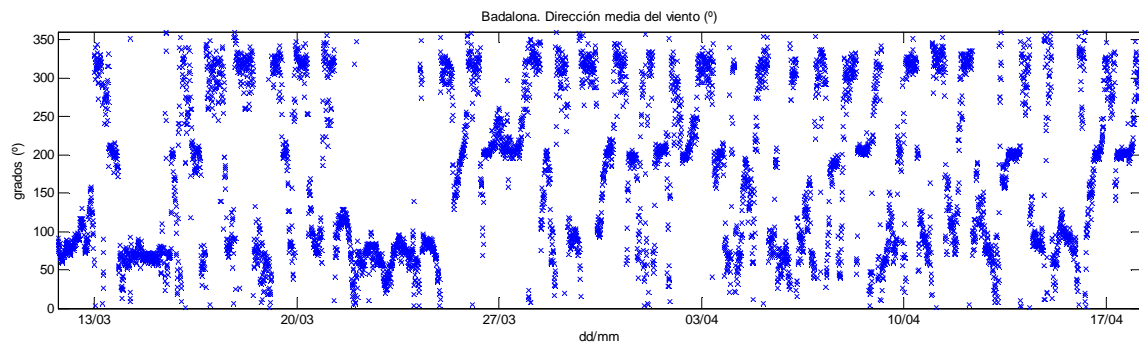


Fig. 91. Badalona. Dirección media del viento.

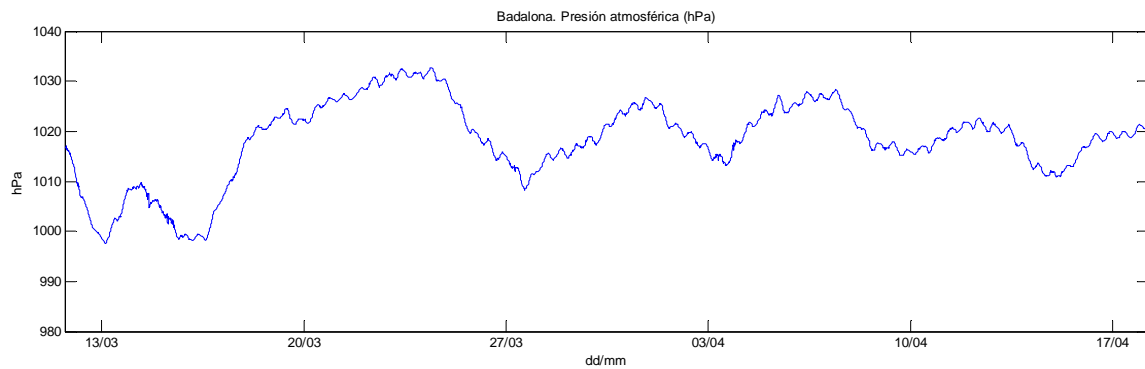


Fig. 92. Badalona. Presión atmosférica.

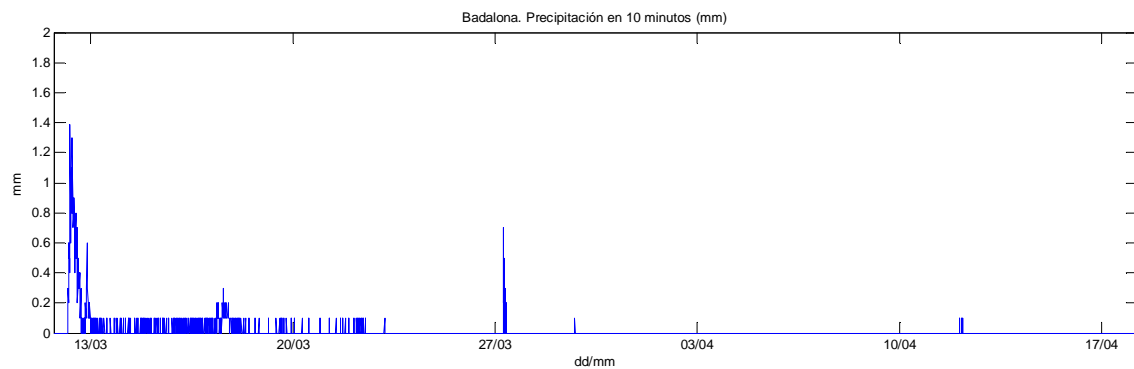


Fig. 93. Badalona. Precipitación en 10 minutos.

4.6.2. ESTACIÓN LLOBREGAT

Para el período de tiempo definido y mediante los sensores instalados en la boya fondeada en este punto, se dispone de conjuntos de datos de velocidad de ráfaga del viento (Fig. 94), velocidad media del viento (Fig. 95) y dirección media del viento (de dónde sopla) (Fig. 96). En este caso, igual que sucede en la estación anterior, los datos se han tomado cada 10 minutos, sumando un total de 5401 datos para cada categoría. Tampoco ha sido necesario realizar ninguna actuación en estos conjuntos de datos.

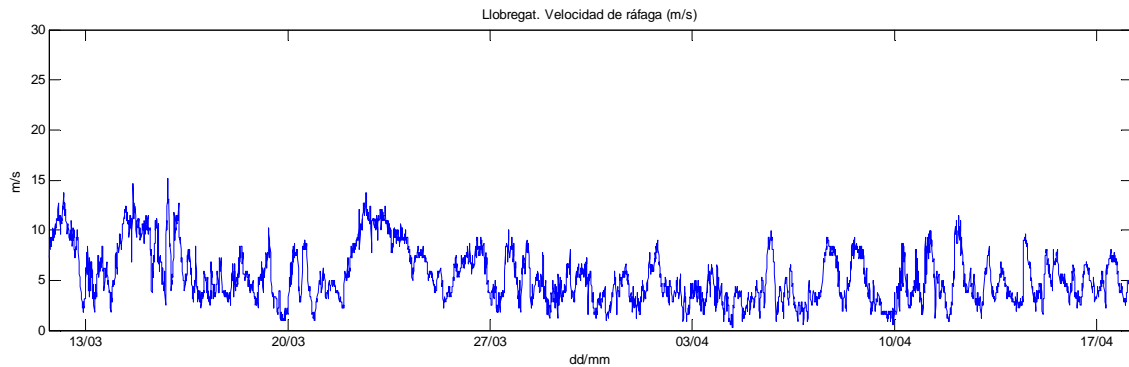


Fig. 94. Llobregat. Velocidad de ráfaga del viento.

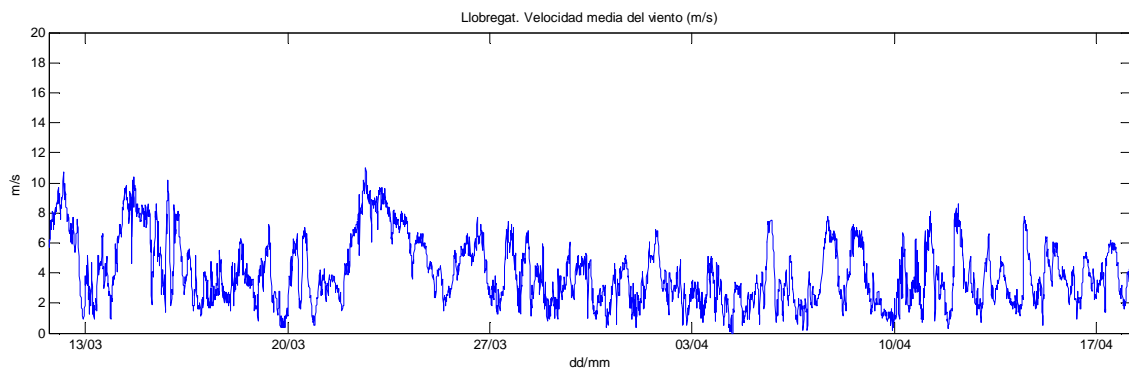


Fig. 95. Llobregat. Velocidad media del viento.

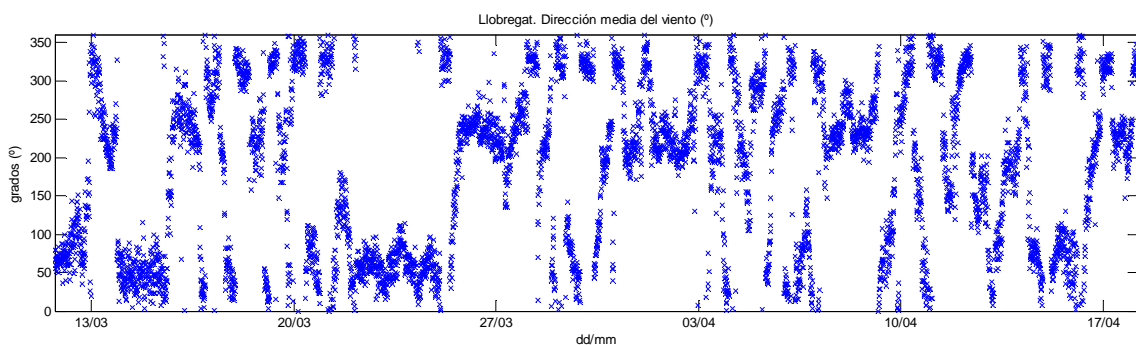


Fig. 96. Llobregat. Dirección media del viento.

4.7. DESCARGAS CONTINENTALES

Además de los datos presentados anteriormente, también se dispone de datos relacionados con las descargas del río Besòs y de los aliviaderos existentes en la zona (representados en la Fig. 10 del apartado 2.3.4.3.). Esta serie de datos han sido obtenidos por la empresa CLABSA (Clavaguera de Barcelona, S.A.) mediante modelización numérica, por lo cual ya han pasado el control de calidad pertinente.

La Fig. 97 muestra los caudales de descarga medidos para el río Besòs y los aliviaderos mencionados para el período de tiempo que se estudia.

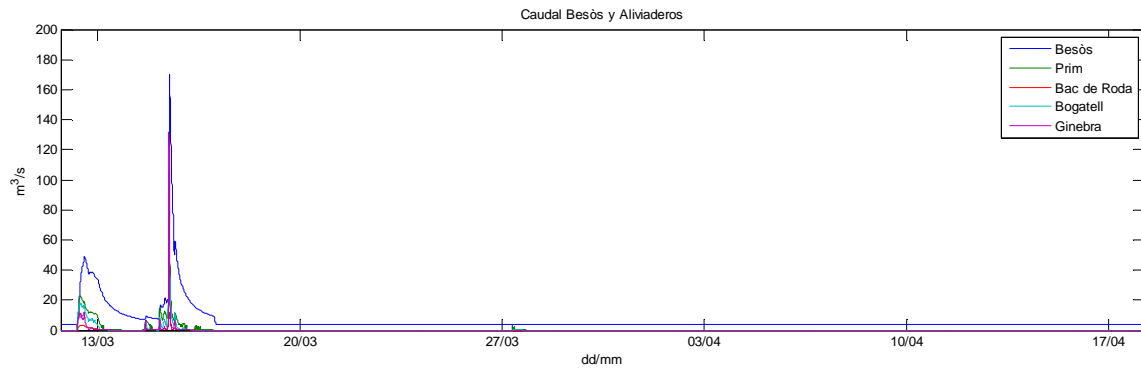


Fig. 97. Caudales de descarga registrados para el río Besòs y los aliviaderos.

5. ANÁLISIS DE LOS DATOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará un breve análisis de cada uno de los conjuntos de datos que se han recopilado y validado en el capítulo anterior. La resuspensión de sedimentos y su posterior transporte vienen influenciados por cada uno de los factores que se analizan a continuación. Además, el hecho de disponer de mediciones en diferentes puntos de la zona proporciona una visión más amplia de los procesos que se generan, por lo que tras analizar las series de datos para cada estación, se realizará a modo de resumen una síntesis general para cada uno de los factores que participan en este estudio.

5.2. CORRIENTES

Como ya se ha mencionado, se disponen de datos de corriente para todas las estaciones del estudio, medidos a diferentes profundidades. Se realizará un análisis centrado especialmente en los datos registrados a más profundidad.

5.2.1. ESTACIÓN A1

Para este punto de estudio, donde el calado total es de 24 metros, se analizarán los datos de corriente obtenidos durante la campaña para las profundidades de 3, 13 y 23 metros.

Profundidad: 3 metros

En estas capas tan cercanas a la superficie, tal como se puede observar en la Fig. 98, la corriente adquiere valores de velocidad muy dispares durante toda la serie. En los períodos en los que la corriente es más intensa (durante el 14 y el 22 de Marzo), se llegaron a alcanzar velocidades que rondan los 60-70 cm/s, aunque se puede observar que las velocidades más comunes para estos episodios se encuentran entre los 40-60 cm/s. También se aprecian otros períodos en los que la velocidad, sin ser tan intensa, se mantiene en torno a los 20-40 cm/s durante un determinado tiempo. La velocidad media que se desprende de esta serie es de 17.6 cm/s.

En cuanto a las direcciones tomadas por la corriente, observando la rosa de corrientes representada en la Fig. 99 se deduce que, en los períodos en los que la corriente es más intensa (a partir de los 30 cm/s), la dirección principal es la SO seguida de la SSO. También se puede apreciar este hecho observando las direcciones representadas en la Fig. 98. Sin embargo, para velocidades menores a 30 cm/s, aunque siguen siendo mayoritarias las direcciones contenidas en el cuadrante SO, también tienen protagonismo las direcciones del cuadrante NE.

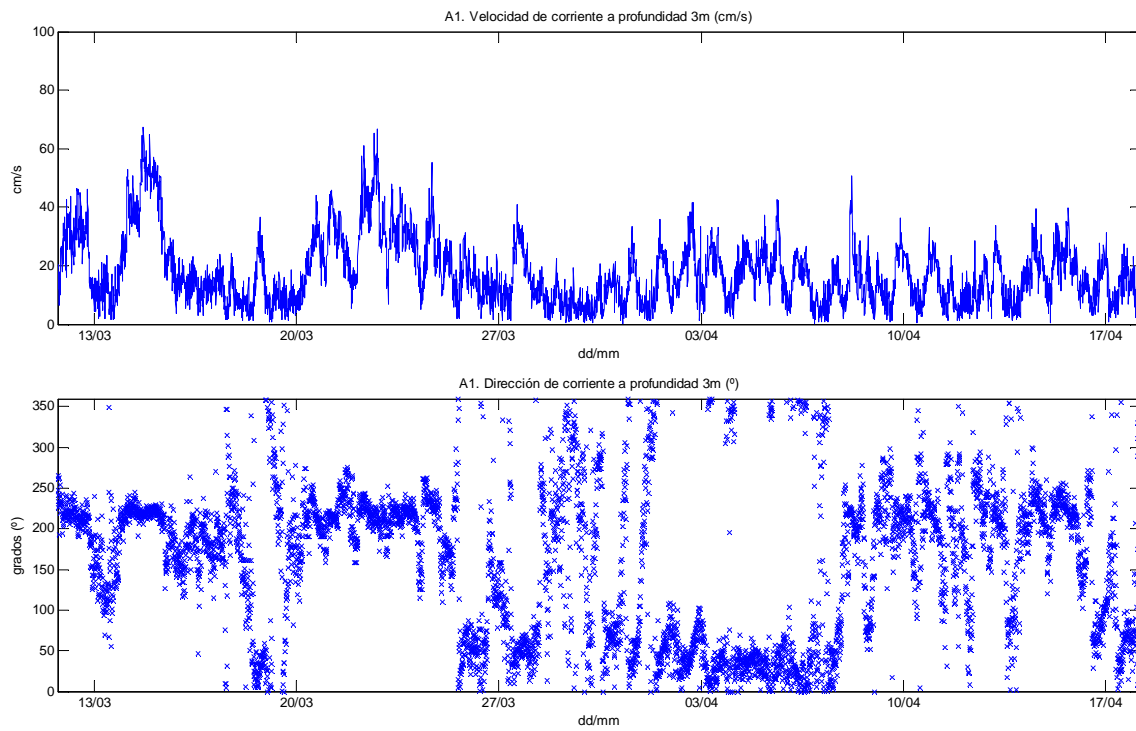


Fig. 98. A1. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 3 metros.

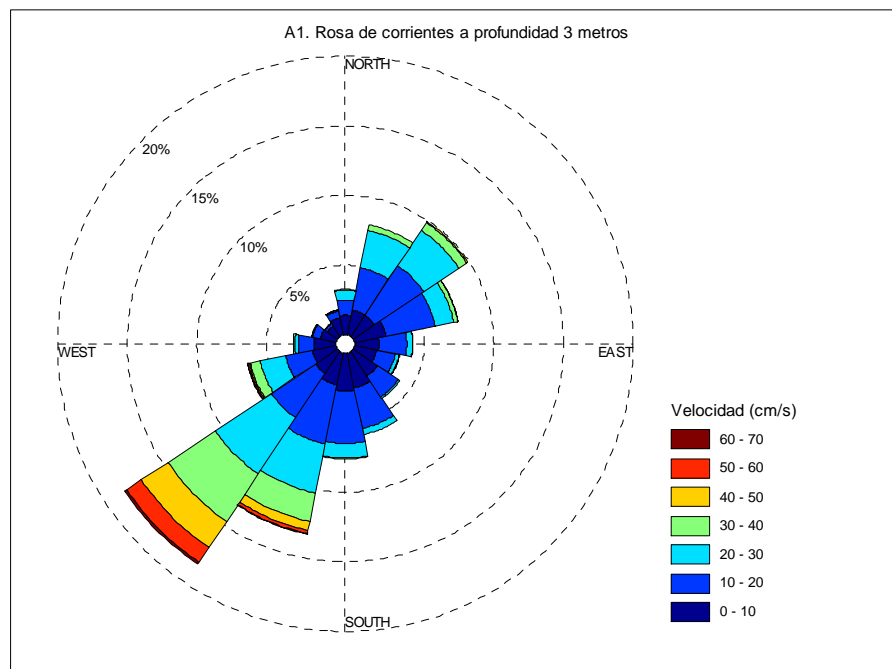


Fig. 99. A1. Rosa de corrientes a profundidad 3 metros.

Profundidad: 13 metros

Como era de esperar, la velocidad de la corriente disminuye conforme aumenta la profundidad. En las capas intermedias no existe tanta variación de velocidades como sucede en las capas superficiales, tal como se puede observar en la Fig. 100. En este caso, las mayores intensidades de corriente registran velocidades que alcanzan los 40 cm/s, siendo el rango 20-40 cm/s el más común en estos episodios. La velocidad media de la corriente a esta profundidad se sitúa en los 12.2 cm/s.

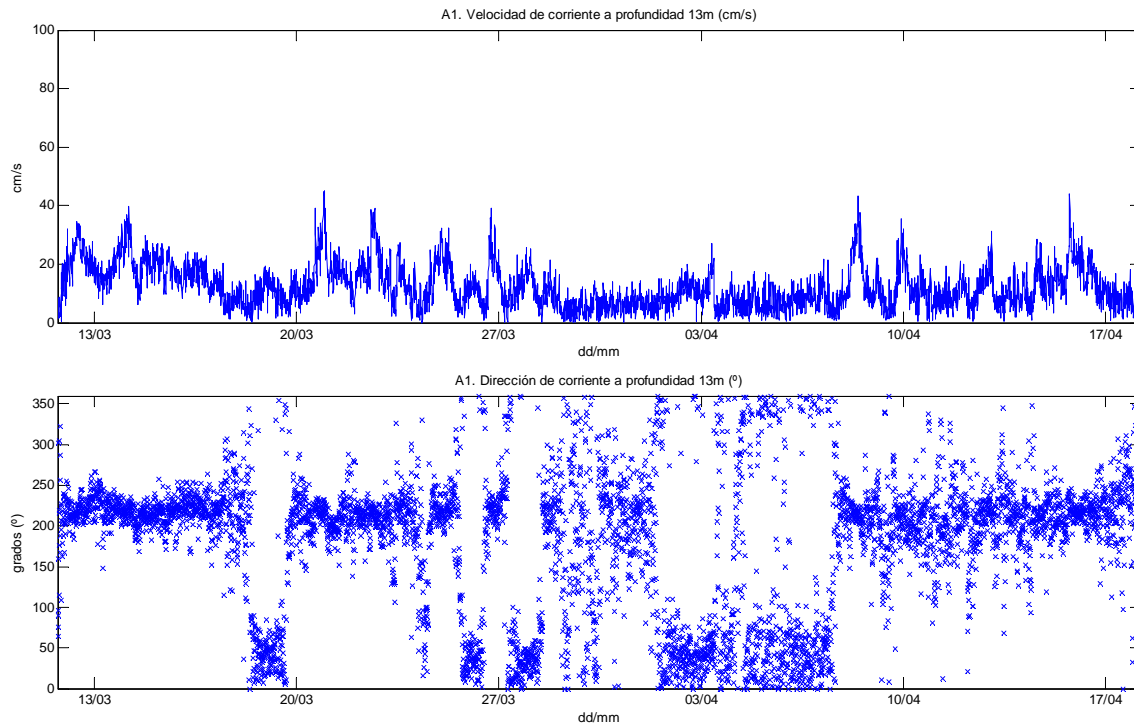


Fig. 100. A1. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 13 metros.

Pasando a analizar las direcciones principales que sigue la corriente en este punto, la rosa de corrientes de la Fig. 101 muestra cómo se acentúa la preferencia por las direcciones SO y SSO, tanto para altas como para bajas intensidades de corriente, en comparación con la Fig. 99, correspondiente a los datos registrados a profundidad 3 metros. Las direcciones contenidas en el cuadrante NE pierden importancia en estas capas intermedias, aunque siguen manteniendo el rol de dirección secundaria para corrientes de baja intensidad.

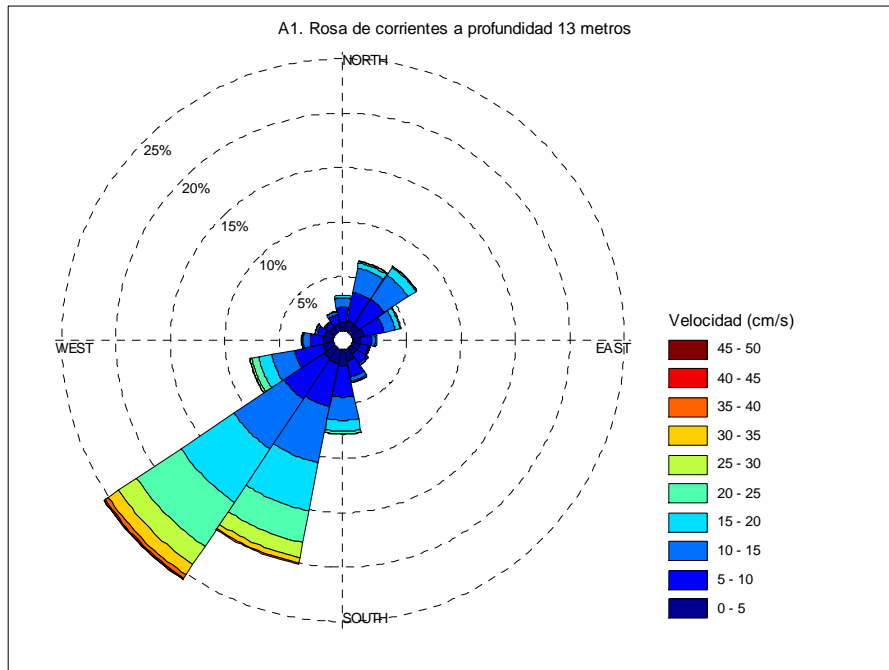


Fig. 101. A1. Rosa de corrientes a profundidad 13 metros.

Profundidad: 23 metros

En las capas más profundas la intensidad de la corriente es menor que en el resto de la columna de agua. Sin embargo, como se puede ver en la Fig. 102, se han llegado a registrar velocidades de 30 cm/s a esta profundidad, manteniendo un rango de 15-30 cm/s en los períodos de más intensidad, correspondientes a los primeros días de la campaña. La velocidad media de la corriente a esta profundidad es de 7.7 cm/s.

La rosa de corrientes representada en la Fig. 103 muestra la predominancia de las direcciones del cuadrante SO para altas y bajas intensidades, siendo la dirección SSO la preferida por la corriente. Las direcciones del cuadrante NE siguen actuando como dirección secundaria, aunque en este caso su frecuencia se asemeja bastante a las direcciones restantes de menor importancia.

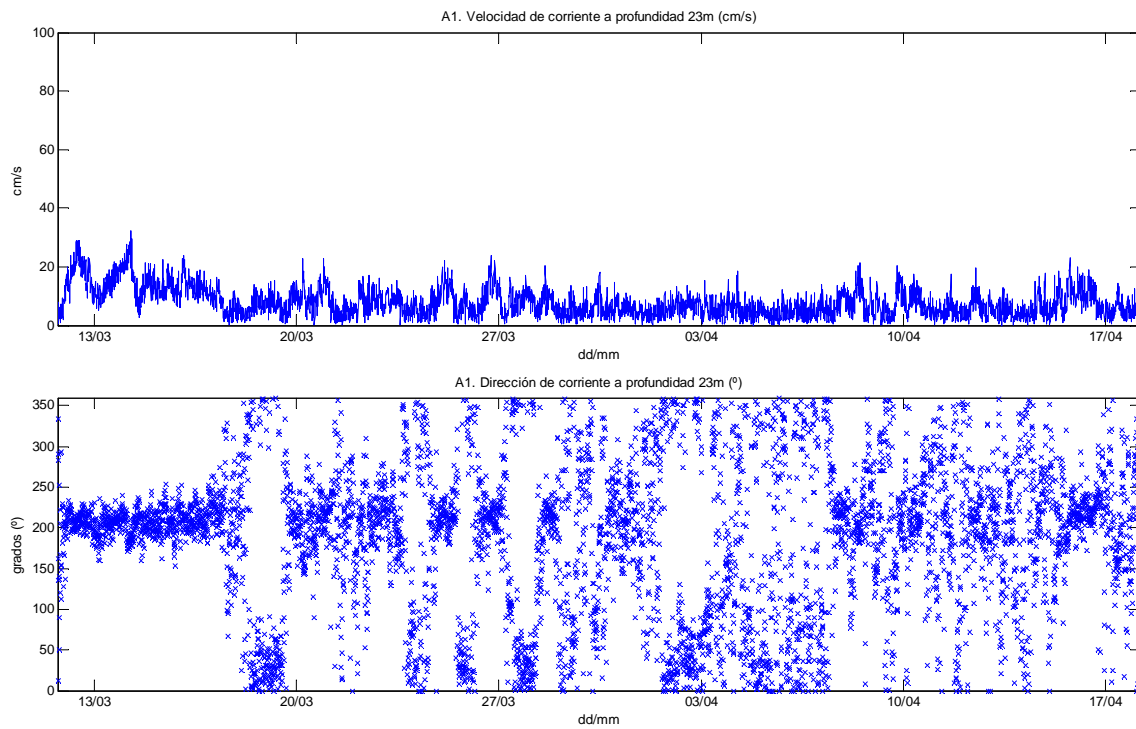


Fig. 102. A1. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 23 metros.

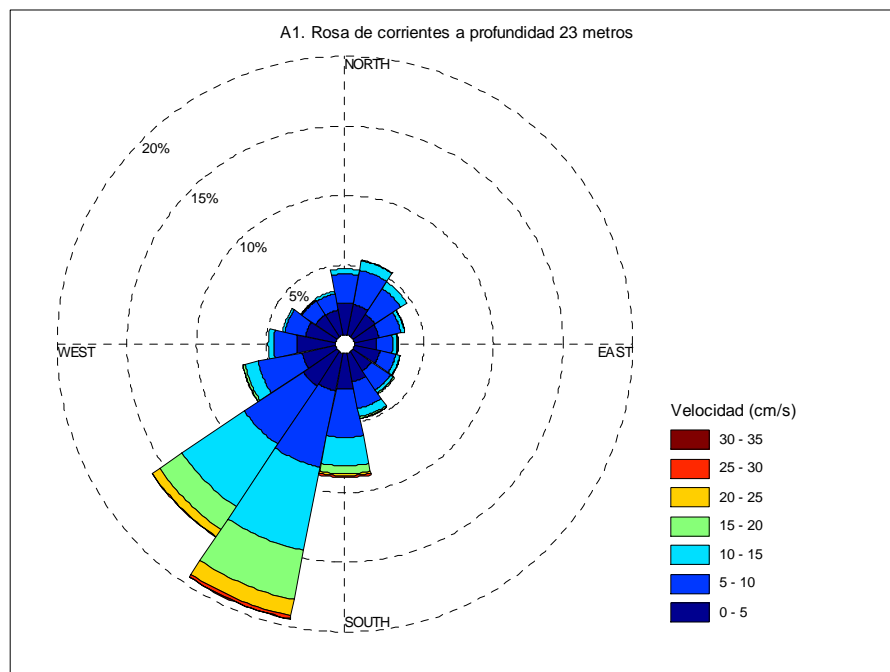


Fig. 103. A1. Rosa de corrientes a profundidad 23 metros.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el hecho de que estos datos de corriente se hayan registrado tan sólo 1 metro por encima del lecho marino y siendo la resuspensión de sedimentos el objetivo de este estudio, se ha considerado conveniente representar la velocidad de corriente proyectada sobre el eje Suroeste (-) – Noreste (+), tal como muestra la Fig. 104.

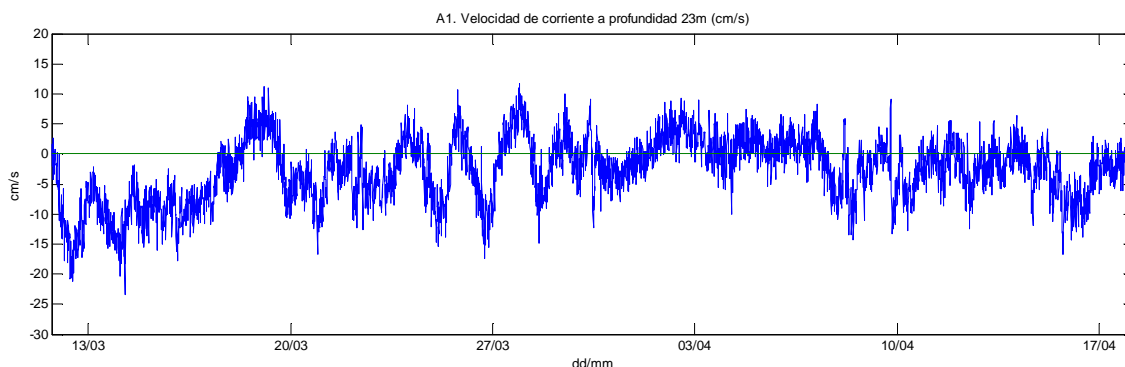


Fig. 104. A1. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

Se observa cómo, sobre todo en las primeras dos semanas, y en especial la primera, el flujo de corriente tiende a desplazarse hacia el Suroeste, mientras que el resto de tiempo toma unas direcciones más variables. Se aprecian velocidades máximas en torno a los 20 cm/s en dirección Suroeste y de 10 cm/s en dirección Noreste.

5.2.2. ESTACIÓN A2

En este punto de estudio, de la misma manera que en el anterior, el calado total es de 24 metros, por lo que se analizarán también datos de corriente para las profundidades de 3, 13 y 23 metros.

Profundidad: 3 metros

Como se puede apreciar en la Fig. 105, se han registrado valores de velocidad de corriente muy variables. Durante el final de la segunda semana de campaña se observan valores máximos que superan sobradamente los 70 cm/s, mientras que en el transcurso de esa misma semana se encuentran períodos de tiempo con valores estables de velocidad entre los 40-70 cm/s. También existen períodos de tiempo durante la serie con valores que se mantienen en un rango de 20-40 cm/s. La velocidad media de la corriente en este punto es de 20.5 cm/s, 2.9 cm/s superior a la registrada en la estación A1.

Pasando a analizar las direcciones más frecuentes que toma la corriente, de la rosa de corrientes representada en la Fig. 106 se desprende que la dirección principal es la SSO seguida de la dirección Sur, sobre todo en los momentos en el que las velocidades son más altas. Como pasaba en la anterior estación, también aparecen direcciones secundarias en el cuadrante NE, en las cuales las velocidades máximas no superan los 40-50 cm/s. Respecto a la anterior estación, se observa un ligero cambio en la dirección principal de la corriente, hecho que tiene una posible explicación en la leve diferencia de orientación que presenta la línea de costa próxima a cada una de las estaciones.

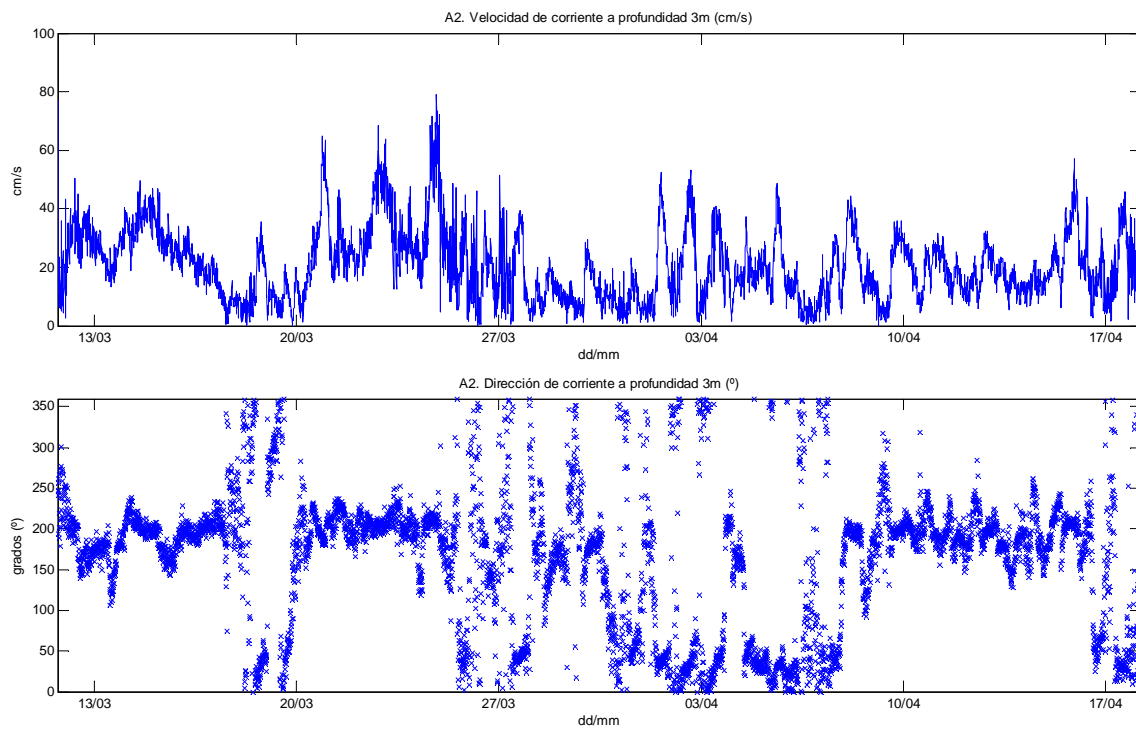


Fig. 105. A2. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 3 metros.

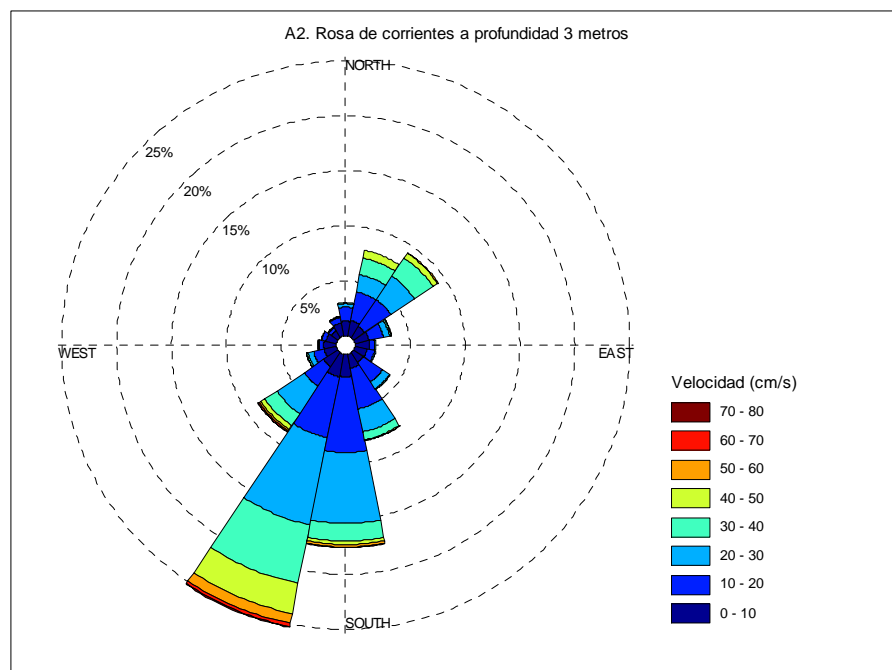


Fig. 106. A2. Rosa de corrientes a profundidad 3 metros.

Profundidad: 13 metros

Las velocidades que toma la corriente a esta profundidad sólo superan los 40 cm/s en momentos muy puntuales, alcanzando velocidades máximas en torno a los 50 cm/s, tal como se observa en la Fig. 107. Este hecho se produce con más frecuencia durante la segunda semana de campaña. También existen algunos períodos más duraderos en los que la velocidad se sitúa entre los 20-40 cm/s. La velocidad media que registra la corriente es de 14.8 cm/s, 2.6 cm/s superior a la calculada para la estación A1.

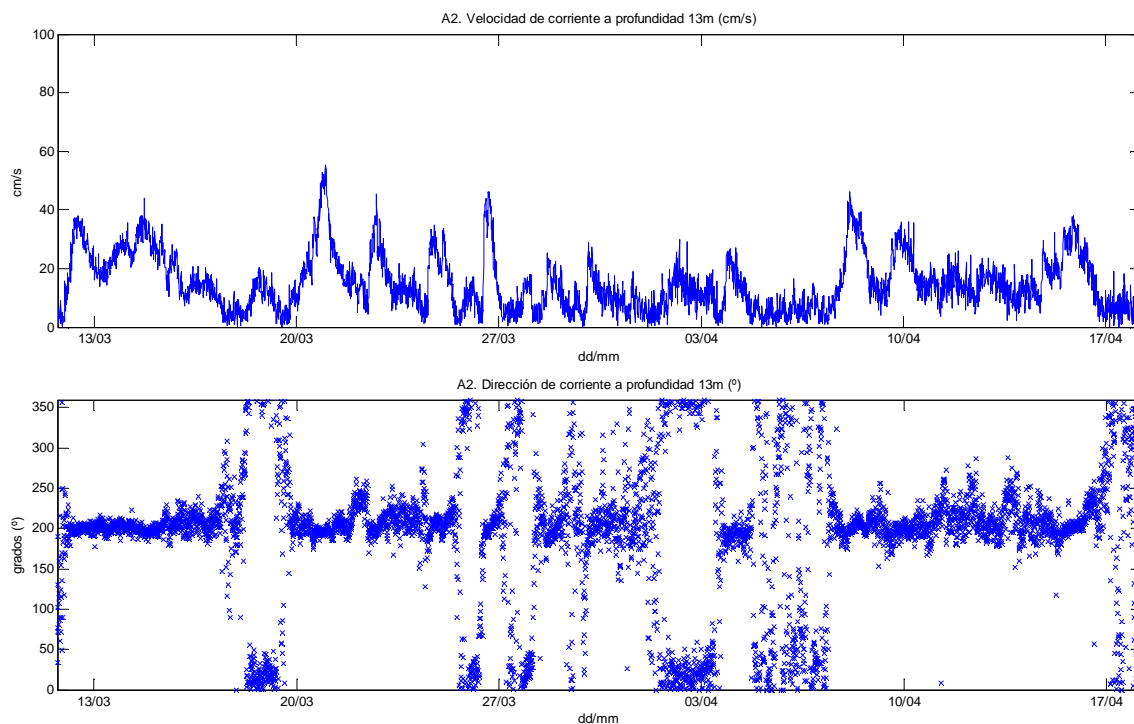


Fig. 107. A2. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 13 metros.

En cuanto al análisis de direcciones principales, la rosa de corrientes representada en la Fig. 108 muestra con claridad que el 40% del tiempo la dirección seguida por la corriente fue la SSO, sobre todo para velocidades a partir de los 20 cm/s. Para velocidades inferiores aparecen también las direcciones SO y Sur, mientras que las direcciones del cuadrante NE apenas se reproducen, teniendo un papel muy secundario como dirección escogida por corrientes de baja intensidad.

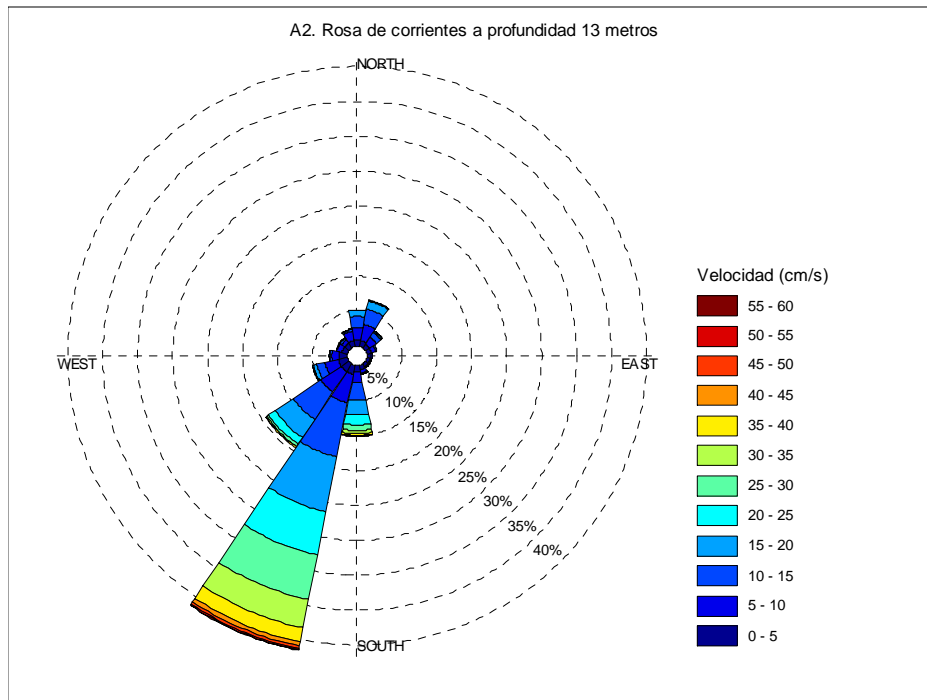


Fig. 108. A2. Rosa de corrientes a profundidad 13 metros.

Profundidad: 23 metros

Como se puede observar en la Fig. 109, las velocidades máximas alcanzan valores entre los 30-40 cm/s en momentos puntuales de la serie, pero en general el flujo de corriente durante la campaña no supera los 20 cm/s. La velocidad media de la corriente a esta profundidad es de 9.6 cm/s, 1.9 cm/s superior a la encontrada para la anterior estación.

La rosa de corrientes representada en la Fig. 110 muestra la predominancia de las direcciones SSO y Sur para altas y bajas intensidades de corriente. Las corrientes secundarias de baja intensidad que toman las direcciones del cuadrante NE, tienden a hacerlo hacia el Norte y NNE en lugar de hacia el NE-NNE como hasta ahora se ha visto.

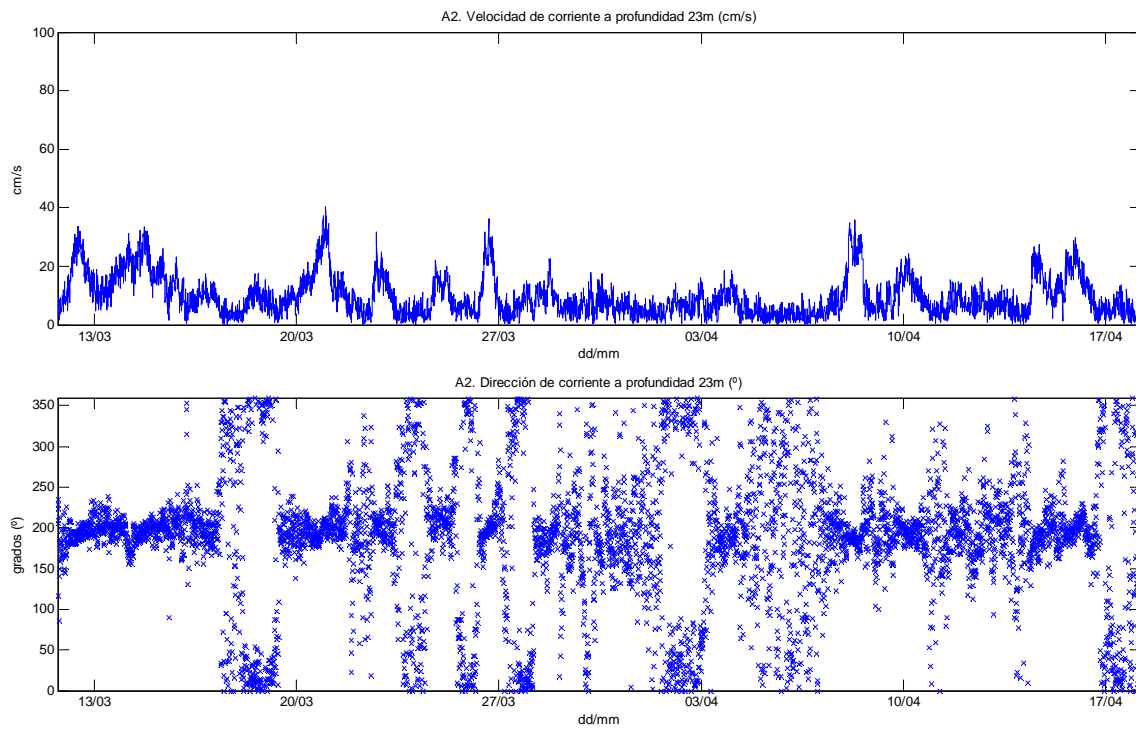


Fig. 109. A2. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 23 metros.

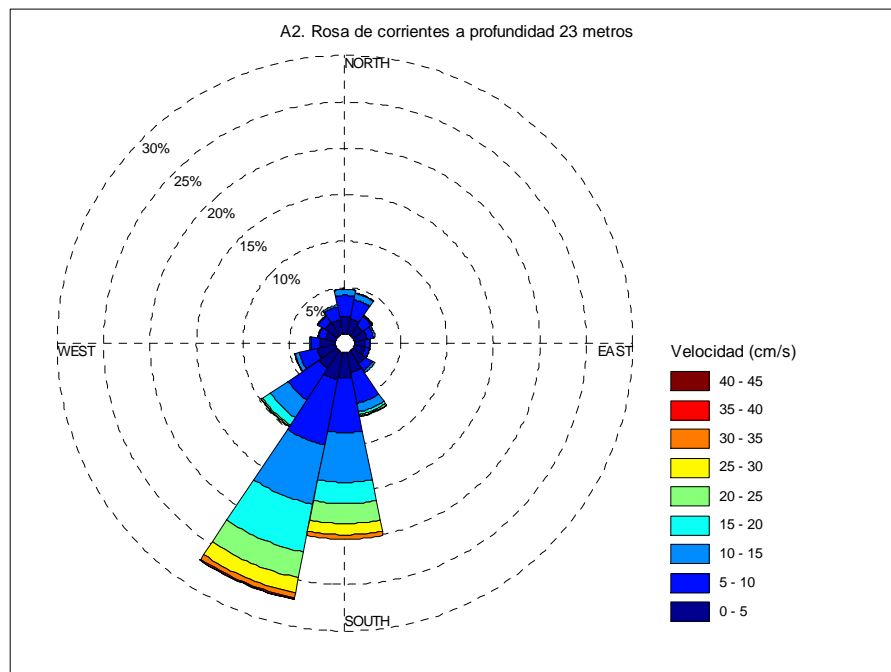


Fig. 110. A2. Rosa de corrientes a profundidad 23 metros.

De la misma manera que sucede en la estación anterior, los datos registrados a más profundidad se sitúan 1 metro por encima del fondo marino, por lo que resulta interesante representar la velocidad de corriente proyectada sobre el eje Suroeste (-) – Noreste (+), tal como muestra la Fig. 111.

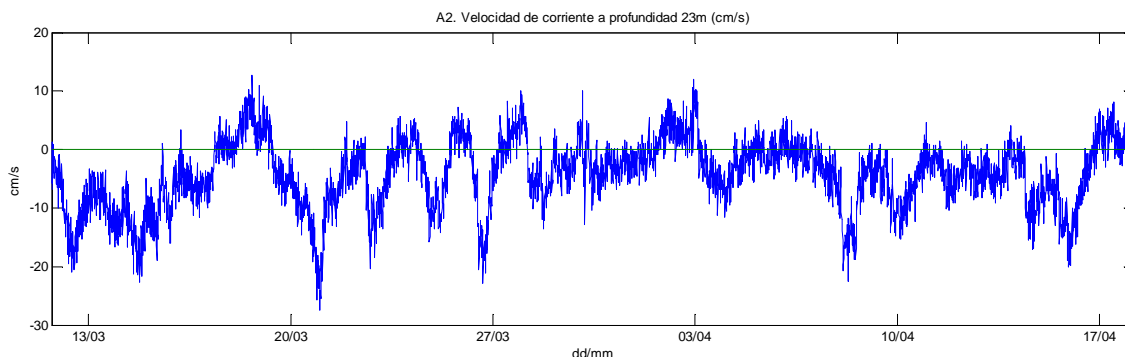


Fig. 111. A2. Velocidad de corriente a profundidad 23 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

En este caso, respecto a la anterior estación, se observa una tendencia más clara de la corriente a tomar la dirección SO, donde se han medido velocidades máximas de 20-30 cm/s. Las velocidades máximas en dirección Noreste se sitúan en torno a los 10 cm/s.

5.2.3. ESTACIÓN A3

Este punto de estudio se encuentra situado más lejos de la costa que las dos estaciones anteriores y, como consecuencia, se halla en aguas más profundas. El calado total en este punto es de 50 metros, por lo que se ha escogido analizar los datos correspondientes a las profundidades de 4, 22 y 40 metros.

Profundidad: 4 metros

Tal como se aprecia en la Fig. 112, durante la primera semana de campaña se registraron en general velocidades entre 20-40 cm/s, mientras que en la segunda se observa como existe más variabilidad, alcanzando valores máximos superiores a 50 cm/s. Durante el tiempo restante de la campaña, donde la variabilidad es menor, se observan generalmente velocidades menores a 30 cm/s. A esta profundidad la velocidad media de la corriente es de 15.2 cm/s, bastante menor respecto a las velocidades medias de corriente obtenidas para las capas superficiales de las anteriores estaciones.

Analizando ya las direcciones frecuentes de la corriente, la rosa de corrientes de la Fig. 113 indica la predominancia del cuadrante SO, como era de esperar, pero con la diferencia de que no existe una dirección específica que sea predominante. Las direcciones SO, SSO y en menor medida OSO, son las más frecuentes, sobre todo para velocidades de corriente superiores a 25 cm/s. Igual que sucede en las anteriores estaciones, también existe una dirección secundaria para corrientes de baja intensidad en dirección NNE y NE.

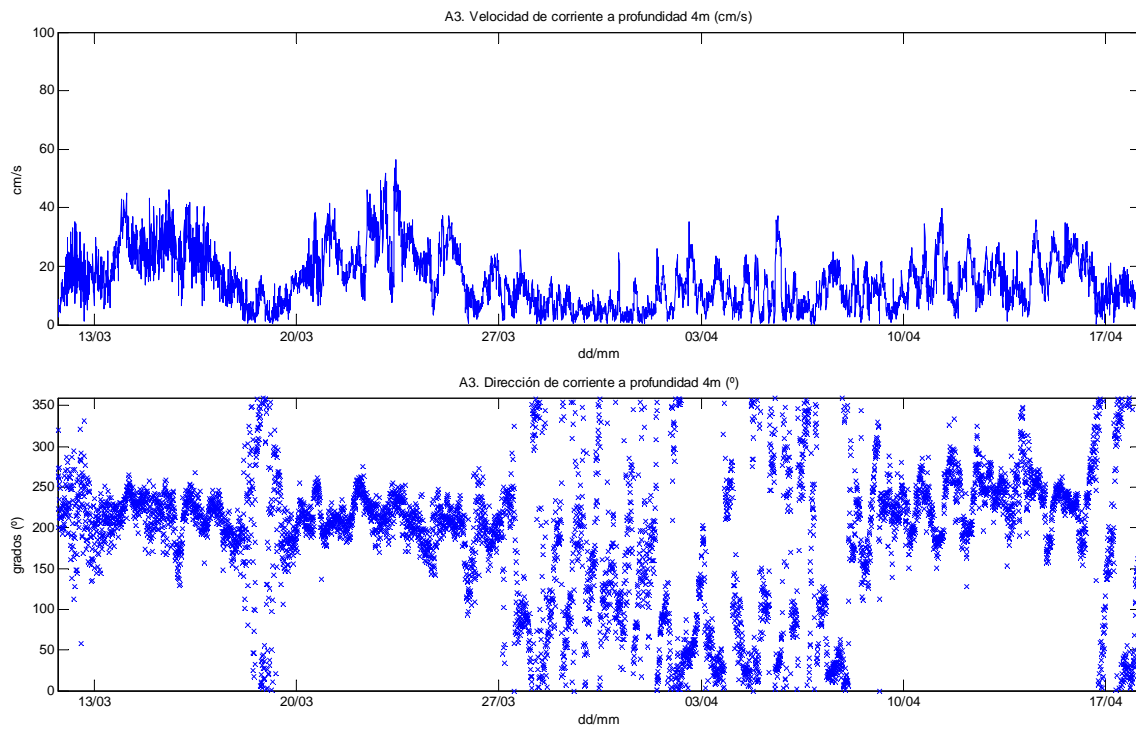


Fig. 112. A3. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 3 metros.

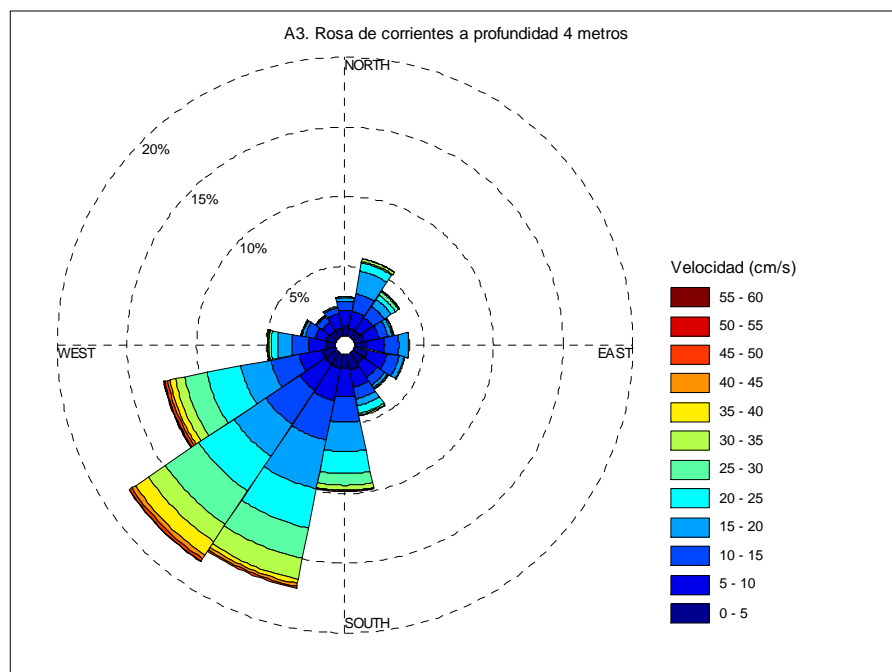


Fig. 113. A3. Rosa de corrientes a profundidad 4 metros.

Profundidad: 22 metros

Las velocidades máximas que toma la corriente a esta profundidad apenas sobrepasan los 30 cm/s, como se puede apreciar en la Fig. 114. Salvo algunos períodos cortos en los que se superan los 20 cm/s, sobre todo durante las dos primeras semanas además de la última, generalmente se registraron velocidades inferiores durante el resto de la campaña. La velocidad media que experimentó la corriente durante el período estudiado fue de 11.3 cm/s.

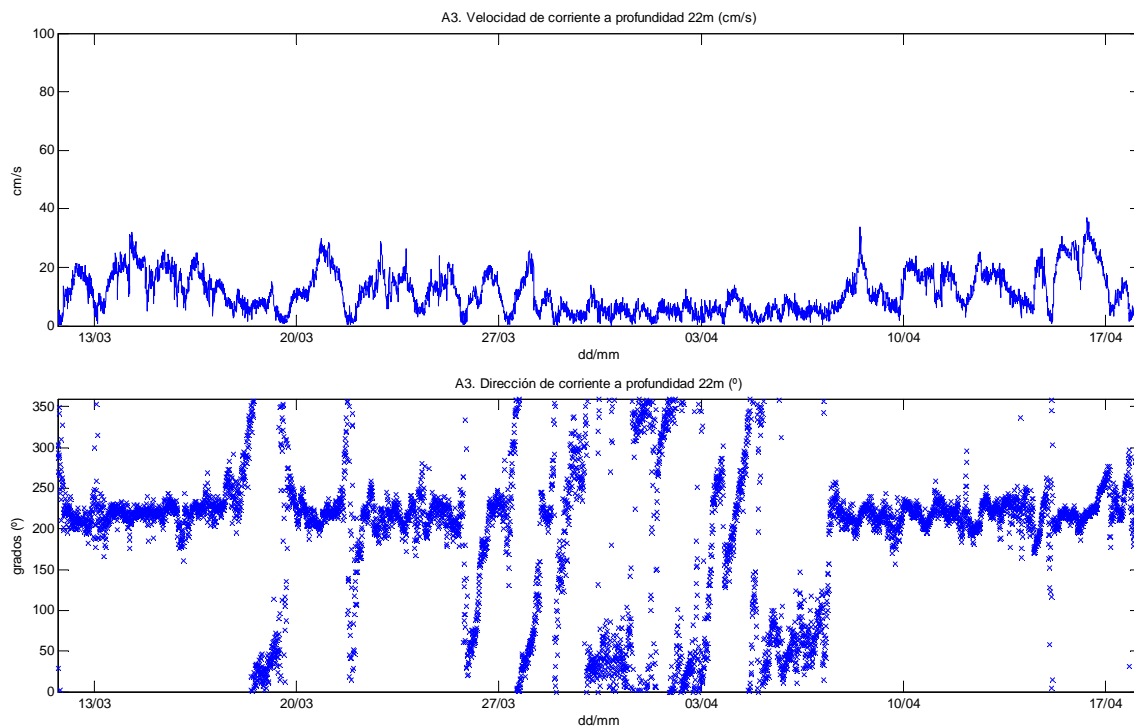


Fig. 114. A3. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 22 metros.

Pasando al análisis de direcciones principales, la rosa de corrientes representada en la Fig. 115 muestra, a diferencia de lo ocurrido a 4 metros de profundidad, la dirección SO como predominante con un 35 % del tiempo, seguida de la dirección SSO, aglutinando entre ellas prácticamente todas las corrientes de más de 10 cm/s. Las direcciones del cuadrante NE siguen teniendo el mismo papel secundario para los flujos de corriente inferiores a 10 cm/s.

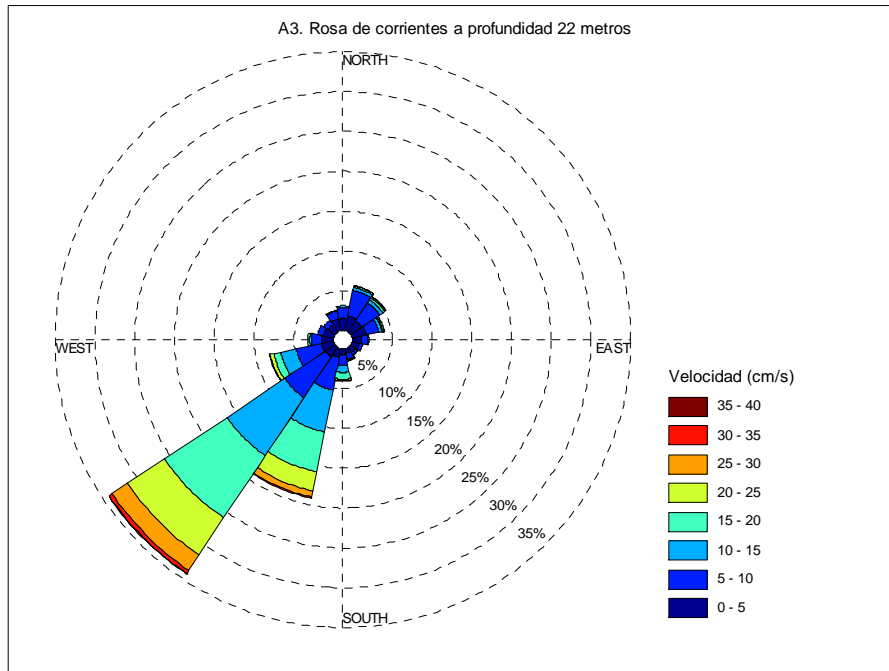


Fig. 115. A3. Rosa de corrientes a profundidad 22 metros.

Profundidad: 40 metros

Las velocidades registradas a esta profundidad superan en ocasiones muy puntuales los 20 cm/s, como se puede deducir de la Fig. 116. Se observa una gran variabilidad de velocidades en el rango 0-20 cm/s. La velocidad media de la corriente a esta profundidad es de 8.9 cm/s.

La rosa de corrientes representada en la Fig. 117 muestra la predominancia de las direcciones SO y SSO para las intensidades más altas de corriente, mientras que para velocidades menores a 15 cm/s las direcciones más frecuentes son la SO y la OSO. Las direcciones NE y NNE aparecen con más frecuencia que en las anteriores profundidades, siendo la segunda opción para las corrientes de baja intensidad.

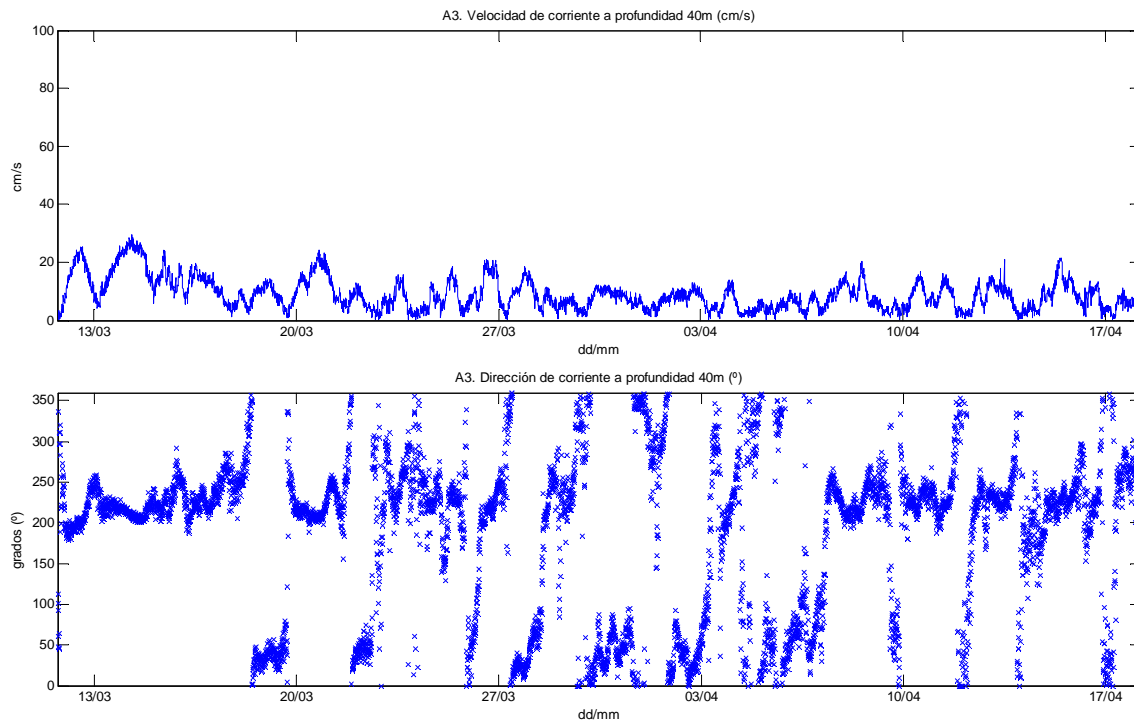


Fig. 116. A3. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 40 metros.

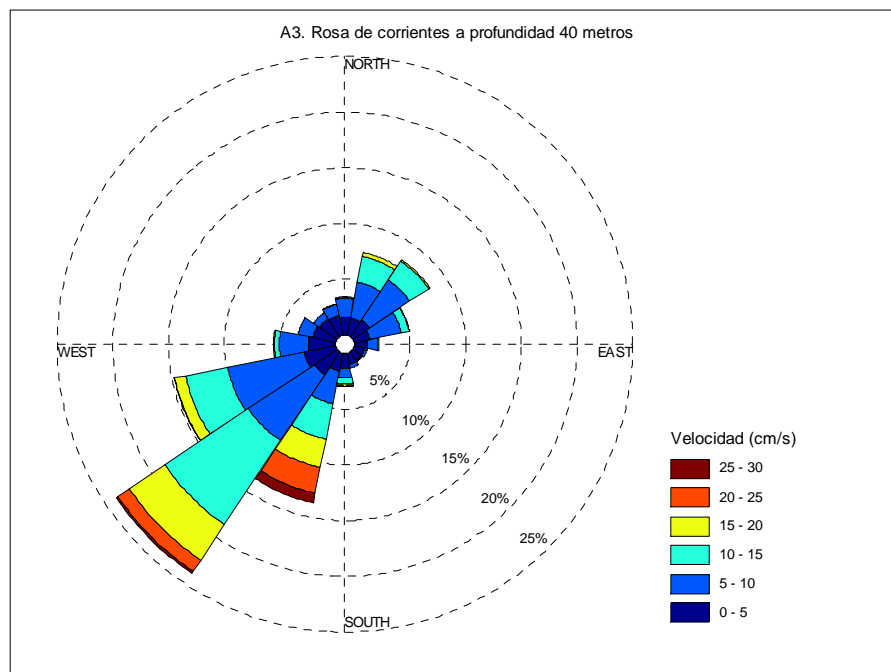


Fig. 117. A3. Rosa de corrientes a profundidad 40 metros.

Como se ha realizado para las estaciones anteriores, se han proyectado las velocidades correspondientes a esta profundidad sobre el eje Suroeste (-) – Noreste (+), tal como muestra la Fig. 118.

En este caso, la estación A3 se encuentra fondeada a 50 metros de profundidad y la toma de datos de velocidad más profunda se ha realizado 10 metros por encima del lecho marino. De esta manera, las mediciones se encuentran un tanto alejadas del fondo, hecho que se deberá tener en cuenta.

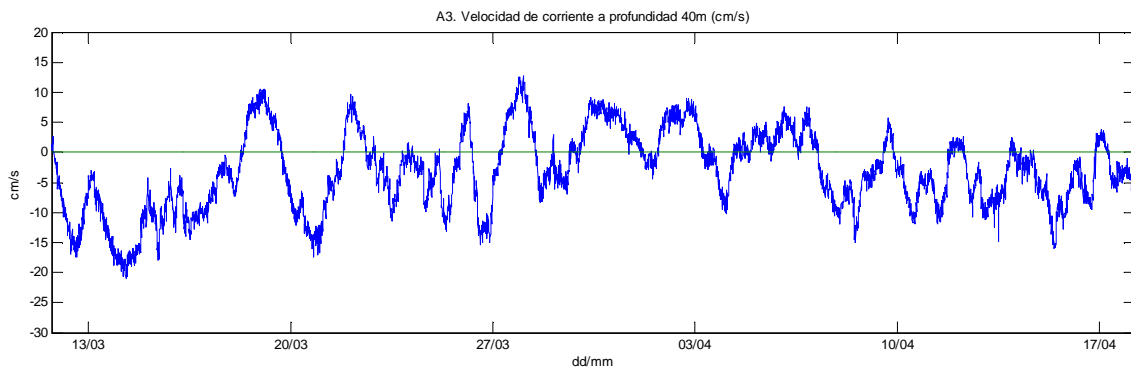


Fig. 118. A3. Velocidad de corriente a profundidad 40 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

Se puede apreciar una regularidad en la dirección más acentuada que en las anteriores estaciones, producida por la mayor profundidad a la que se han realizado las mediciones. Se sigue observando una tendencia hacia al Suroeste que se hace palpable sobre todo en la primera semana. Las velocidades máximas se sitúan sobre los 20 cm/s para la dirección Suroeste y sobre los 10-15 cm/s para la dirección Noreste.

5.2.4. ESTACIÓN BADALONA

Este punto de medida, el más cercano a la costa de los cinco que componen este estudio, se sitúa en el Pont del Petroli, donde el calado llega a los 12 metros. Esta cercanía a la línea de costa deberá ser tenida en cuenta en el análisis. La serie de datos de corrientes disponible corresponde a mediciones realizadas a 5 metros de profundidad.

Según indica la Fig. 119, las velocidades máximas registradas superan levemente los 20-30 cm/s en algunos períodos puntuales que se van sucediendo a lo largo de la campaña, períodos en los que se incrementa suavemente la intensidad de la corriente. Sin embargo, por norma general estas velocidades se encuentran por debajo de los 20 cm/s, siendo 7.3 cm/s la velocidad media del período estudiado.

En cuanto a las direcciones principales que toma la corriente, destaca notablemente la dirección OSO, que engloba la totalidad de corrientes de alta intensidad y la mayoría de corrientes de baja intensidad (por debajo de 20 cm/s) (Fig. 120). También aparece en el mismo cuadrante la dirección Oeste como opción para las corrientes más débiles. Igual importancia adquiere en este punto la dirección Este para este tipo de corrientes, ya que al producirse tan cerca de la costa, se puede deducir que se tratan de corrientes de resaca, es decir, flujos que se dirigen de la costa hacia el mar.

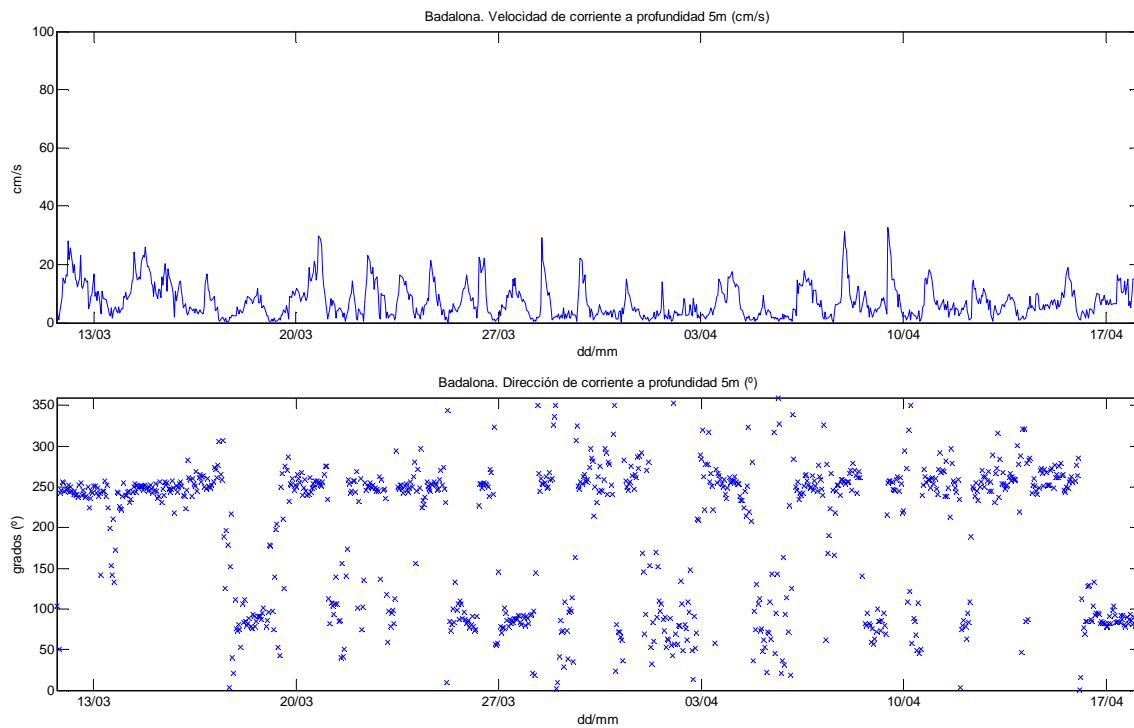


Fig. 119. Badalona. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 5 metros.

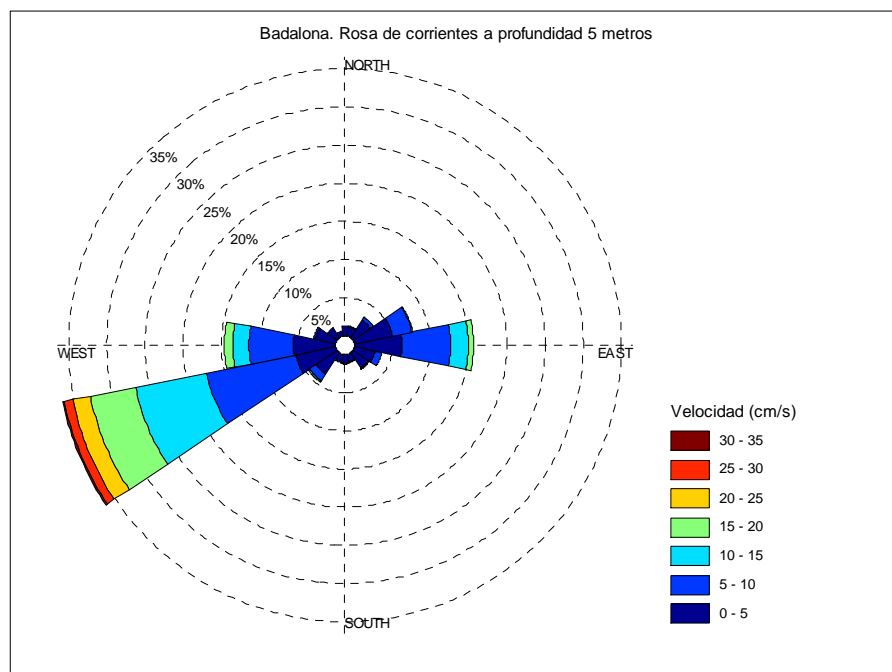


Fig. 120. Badalona. Rosa de corrientes a profundidad 5 metros.

La representación de los datos de velocidad proyectados sobre el eje SO-NE se puede apreciar en la Fig. 93.

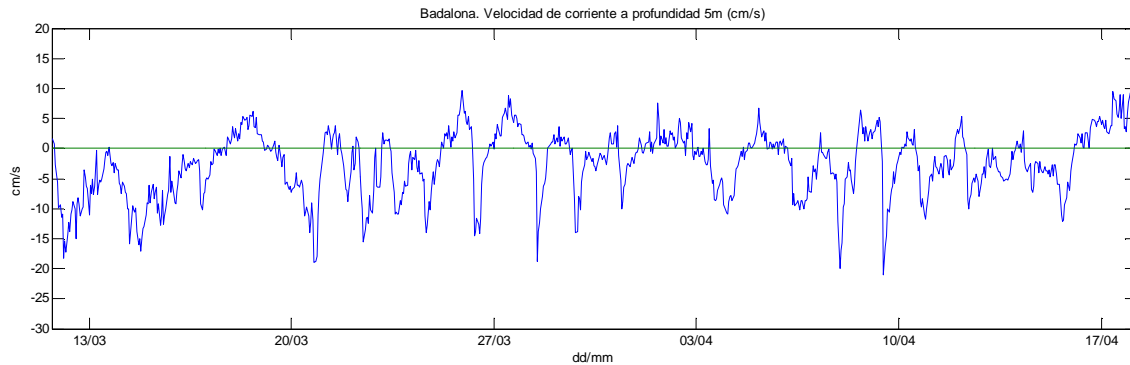


Fig. 121. Badalona. Velocidad de corriente a profundidad 5 metros proyectada sobre el eje SO-NE.

Como ya se ha visto en la rosa de corrientes de la Fig. 120, predomina la dirección Suroeste sobre la Noreste. Las fluctuaciones de dirección que se producen coinciden con los períodos en los que la corriente adquiere más intensidad desplazándose en dirección SO. Estas variaciones deben tener su origen en los fenómenos que se producen cerca de la costa. Los valores máximos alcanzan con dificultad los 20 cm/s en dirección Suroeste, mientras que en dirección Noreste no llegan a los 10 cm/s. También hay que destacar la predominancia de la dirección SO durante la primera semana.

5.2.5. ESTACIÓN LLOBREGAT

La boya encargada de registrar los datos de corriente en este punto se encontraba fondeada a 45 metros de profundidad. Sin embargo, las mediciones no tuvieron lugar en la zona más profunda, sino en las capas más superficiales, proporcionando datos de corriente a 1 y 15 metros de profundidad.

Profundidad: 1 metro

Las velocidades de corriente registradas en este punto destacan por su alta intensidad, como se aprecia en la Fig. 122, llegando a sobrepasar los 80 cm/s durante la primera semana de campaña. Se observa también otro repunte durante la segunda semana, manteniendo velocidades superiores a los 40 cm/s durante un extenso período de tiempo. En la tercera y cuarta semana se reduce la intensidad, mientras que en la última se aprecian de nuevo incrementos puntuales de la velocidad. Todo ello se traduce en una alta velocidad media durante la campaña, que se sitúa en los 27.1 cm/s

En el análisis de las direcciones más frecuentes tomadas por la corriente, se puede apreciar como las corrientes intensas de más de 30 cm/s siguen exclusivamente las direcciones SO y SSO en especial (Fig. 123). Destaca la inexistencia de corrientes de baja intensidad que tomen direcciones del cuadrante NE, como sucedía en las anteriores estaciones. Se observa como estas corrientes de velocidades inferiores a 20 cm/s tienden a tomar como direcciones secundarias el SE y el SSE.

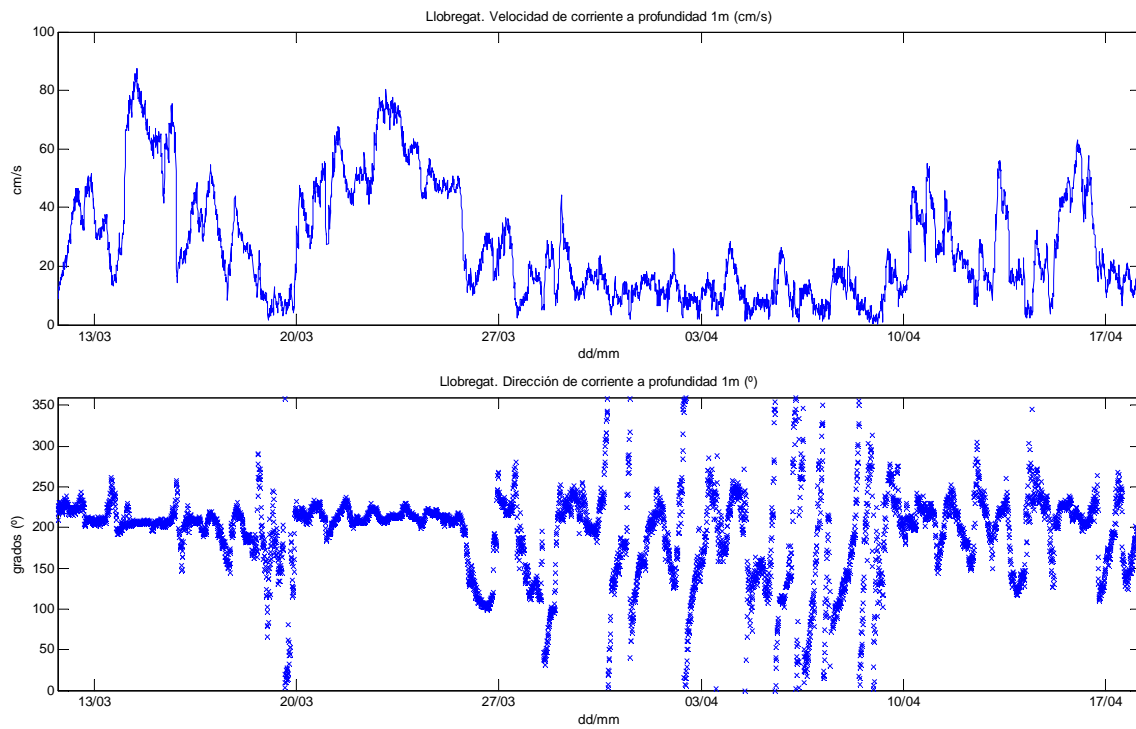


Fig. 122. Llobregat. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 1 metro.

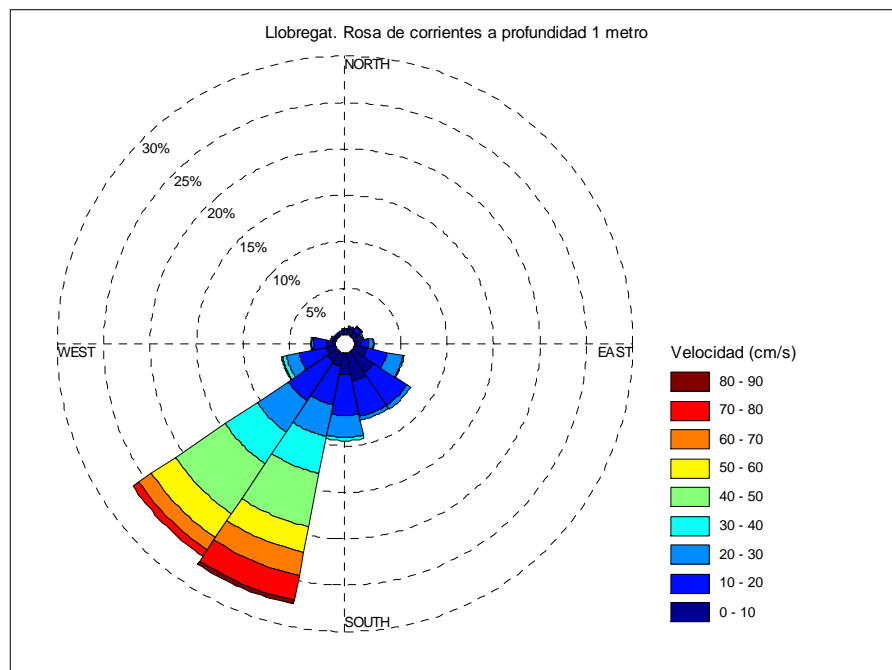


Fig. 123. Llobregat. Rosa de corrientes a profundidad 1 metro.

Profundidad: 15 metros

Los datos tomados a esta profundidad siguen revelando altas intensidades de corriente, como se puede observar durante la primera semana de campaña, en la cual se alcanzan los 80 cm/s (Fig. 124). Durante las siguientes semanas se observa más variación, aunque se mantienen de cierta manera unas intensidades medias-altas en algunos períodos puntuales, rondando los 40-50 cm/s. Fruto de ello es la velocidad media calculada para esta serie, que fue de 23.6 cm/s.

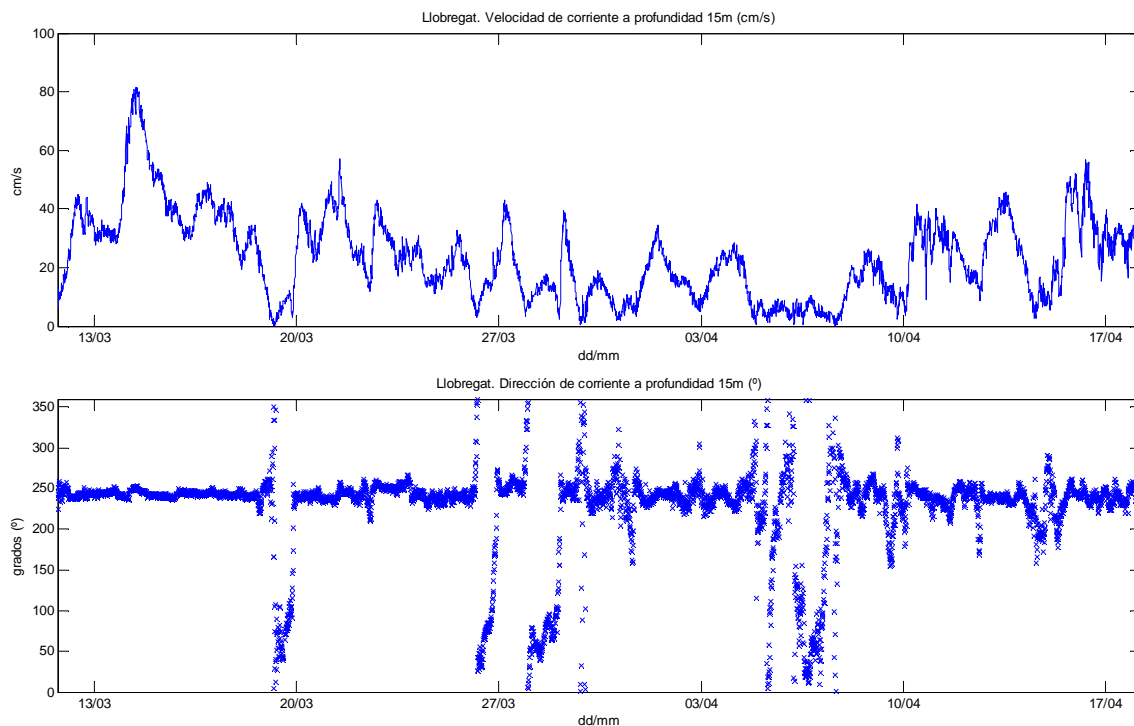


Fig. 124. Llobregat. Velocidad y dirección de corriente a profundidad 15 metros.

Observando la rosa de corrientes representada en la Fig. 125 y las direcciones de corriente de la Fig. 124, destaca la uniformidad que muestran las corrientes en su desplazamiento, tomando la dirección OSO durante más del 60% del tiempo que duró la campaña. De forma excepcional, aquellas corrientes de velocidad inferior a 30 cm/s se desvían levemente hacia el SO.

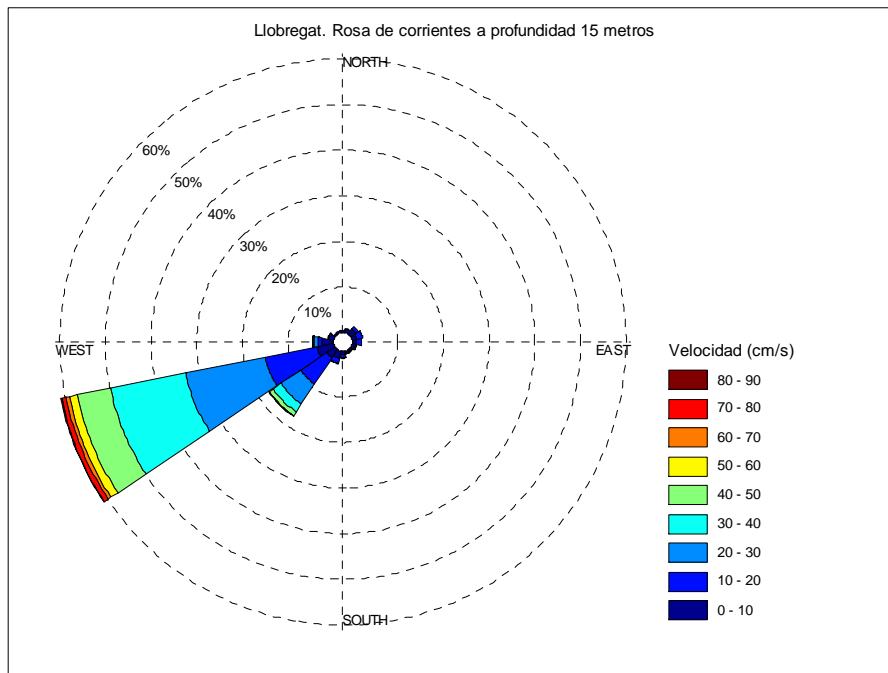


Fig. 125. Llobregat. Rosa de corrientes a profundidad 15 metros.

Para esta estación, a diferencia de las anteriores, no se ha considerado lógico representar la proyección sobre el eje SO-NE de los datos de corriente tomados a 15 metros de profundidad, puesto que el lecho marino en este punto de estudio se encuentra situado 30 metros por debajo.

5.2.6. SÍNTESIS

En términos generales, una vez analizadas las corrientes para cada una de las estaciones, se puede ratificar la existencia de una fuerte corriente litoral en dirección SO (Fig. 5 del apartado 2.3.2.1), así como una corriente más secundaria que se produce en ocasiones en dirección NE. Estas corrientes se reproducen en diferentes condiciones en cada punto de medida, con más o menos intensidad, pero se observa coincidencia en los comportamientos a lo largo de las series. Se pueden diferenciar cuatro etapas o períodos a lo largo de la campaña.

Las dos primeras se producen durante la primera y segunda semana respectivamente, coincidiendo con el aumento de las intensidades de la corriente y presentando un descenso significativo durante un breve período entre ambas semanas. La tercera etapa está compuesta por la tercera y la cuarta semana, en la cual se observa un período de más calma y bajas intensidades de corriente. La cuarta etapa tiene lugar durante la última semana, en la que vuelven a registrarse intensidades medias-altas de corriente, aunque no tan pronunciadas como durante las dos primeras semanas.

5.3. OLEAJE

A continuación, se analizarán los datos de oleaje registrados en cada una de las estaciones.

5.3.1. ESTACIÓN A1

Como se puede ver en la Fig. 126, durante la primera semana se observan dos picos de altura significativa de ola (H_s) que alcanzan los 2.5 m de altura. Estos oleajes tan energéticos se corresponden con dos episodios de tormenta que tienen lugar durante ese período, como se verá más adelante. Tras la primera semana, se observa también un ligero repunte de las alturas de ola, que alcanzan 1.5 m de altura. Finalmente, tras una tercera semana de calma, se aprecia una leve agitación durante las últimas dos semanas.

La máxima altura de ola registrada durante toda la campaña fue de 5.13 m, mientras que el período de pico máximo fue de 9.78 s, siendo el período de pico medio 5.96 s. De las rosas de oleaje de la Fig. 127 se puede deducir que el oleaje más energético proviene del Este y del ESE, mientras que conforme disminuye su energía las olas tienden a adoptar orientaciones provenientes del Sur.

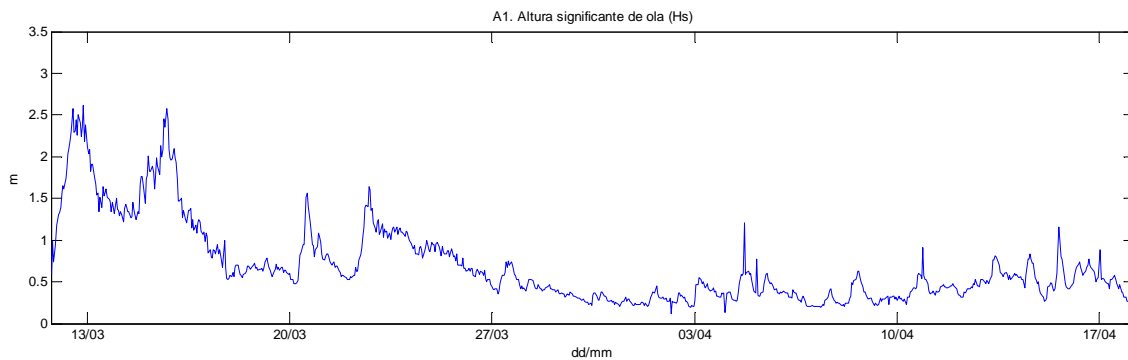


Fig. 126. A1. Altura significativa de ola (H_s).

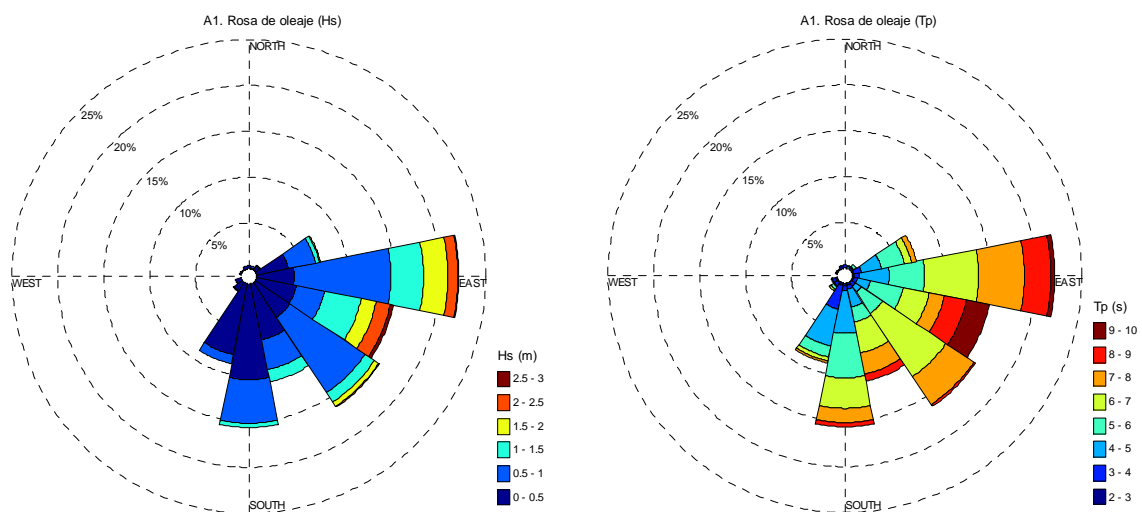


Fig. 127. A1. Rosas de oleaje para la altura significativa de ola (izq.) y el período de pico (dcha.).

5.3.2. ESTACIÓN A2

En este punto de la campaña, durante los dos episodios de tormenta iniciales, se han registrado alturas significantes de ola que llegan a los 3 m, manteniendo alturas mínimas de 1-1.5 m, tal como se aprecia en la Fig. 128. Durante la segunda semana se observa otro episodio de oleaje energético, aunque no tan pronunciado como el primero, con alturas de ola entre 0.5-1.5 m. La tercera y cuarta semana destacan por la calma que se produce en el oleaje durante ese período, mientras que en la última semana se aprecia una ligera agitación.

En este conjunto de datos la máxima altura de ola registrada alcanza los 5.16 m, el período de pico máximo es de 9.63 s y el período de pico medio se eleva a los 6.7 s, casi un segundo más que en la estación anterior. El comportamiento direccional del oleaje se asemeja bastante al correspondiente a la estación A1, como se desprende de la Fig. 129. El oleaje con más energía proviene preferentemente del Este, mientras que en los períodos de calma las olas toman direcciones provenientes del Sur.

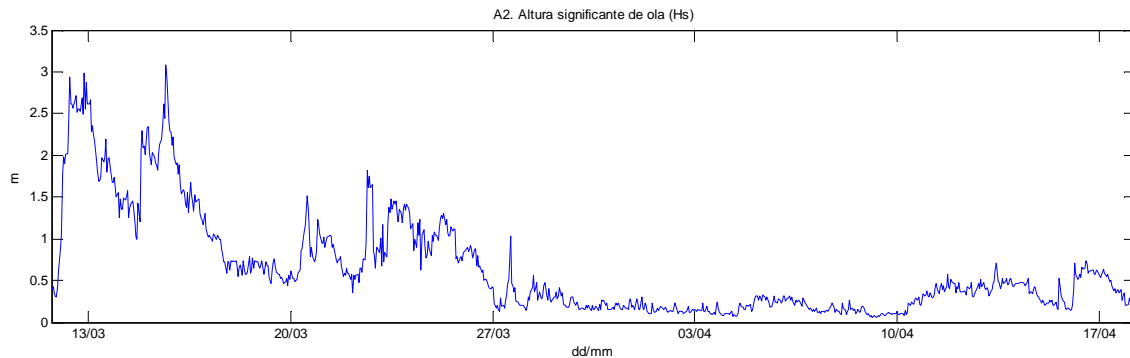


Fig. 128. A2. Altura significativa de ola (Hs).

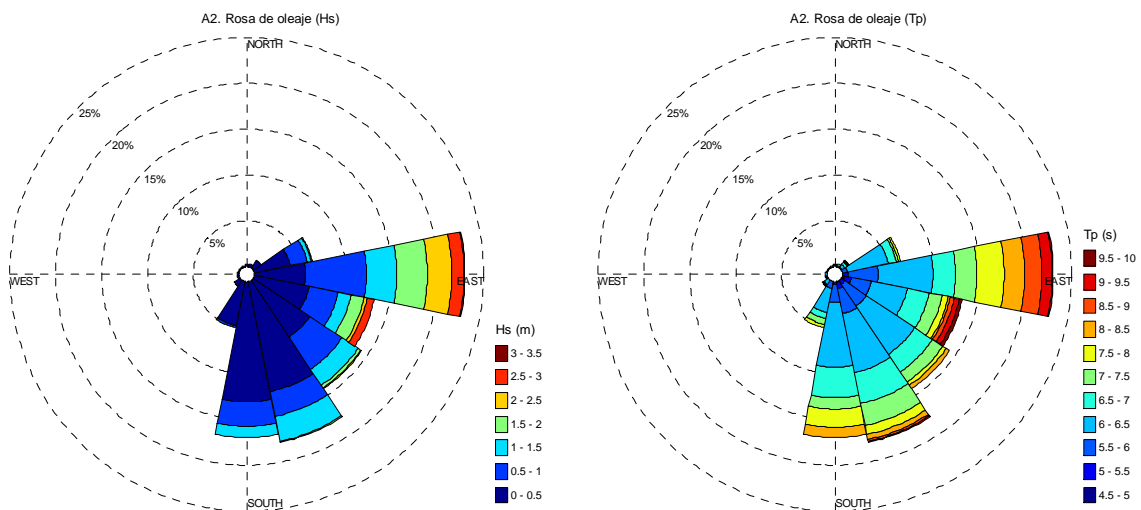


Fig. 129. A2. Rosas de oleaje para la altura significativa de ola (izq.) y el período de pico (dcha.).

5.3.3. ESTACIÓN A3

Según se desprende de la Fig. 130, el comportamiento del oleaje en este punto se asemeja bastante a las anteriores estaciones, con dos picos de altura significativa de ola que alcanzan los 3 m durante los primeros días de la primera semana. Tras un breve descenso energético pasado el período de tormentas, durante la segunda semana se produce un episodio donde las alturas de ola se sitúan entre los 0.5-1.5 m. Durante las dos semanas siguientes no se observa mucha agitación, mientras que en la última se llegan a alcanzar alturas de ola de 1 m.

La altura máxima de ola medida en esta estación es de 5.31 m, el mayor período de pico registrado es de 11.11 s, mientras que el período de pico medio es de 6.16 s. Pasando a analizar las direcciones más frecuentes de donde provienen las olas, en las rosas de oleaje de la Fig. 131 se puede llegar a la misma conclusión que en anteriores estaciones, es decir, oleaje energético proveniente del Este y ESE, y oleaje en calma propagándose desde el Sur y el SSO.

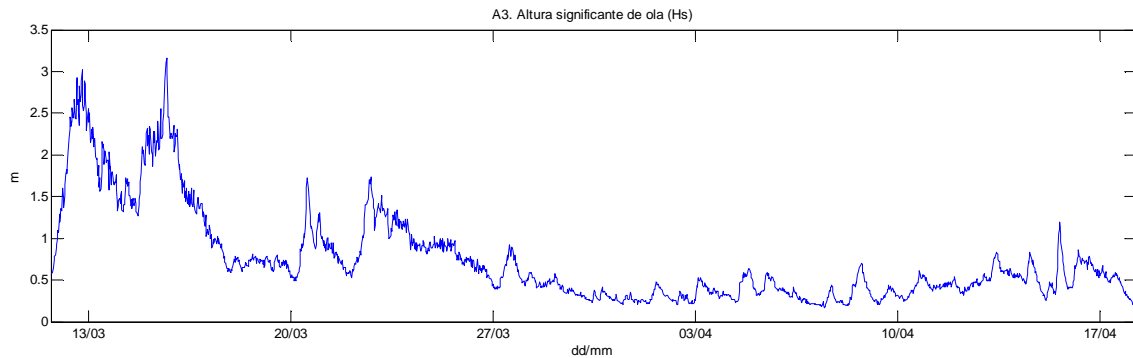


Fig. 130. A3. Altura significativa de ola (Hs).

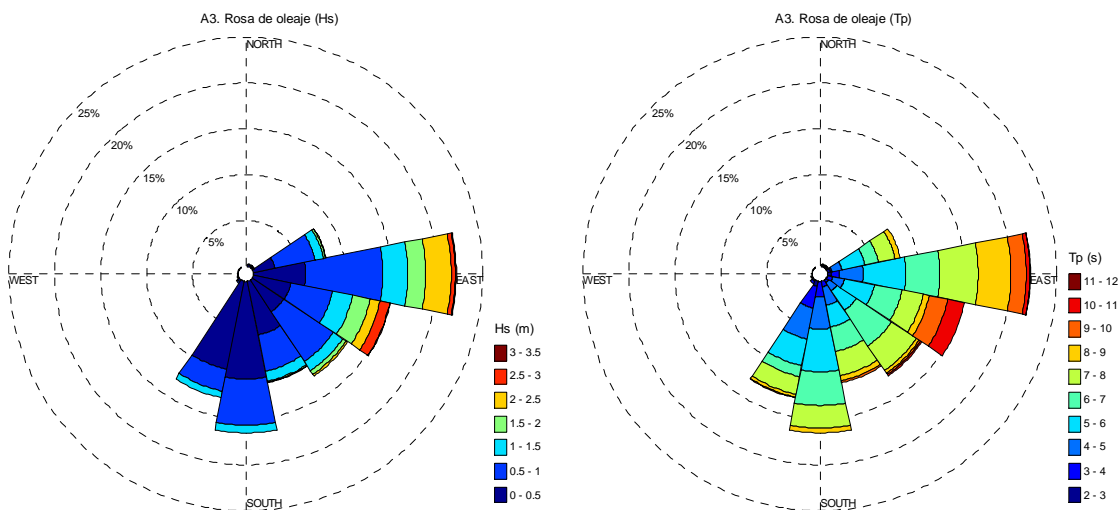


Fig. 131. A3. Rosas de oleaje para la altura significativa de ola (izq.) y el período de pico (dcha.).

5.3.4. ESTACIÓN BADALONA

El esquema de variaciones de la altura significativa de ola para este punto de estudio sigue la misma pauta que las anteriores estaciones (Fig. 132). Sin embargo, los picos que se producen son de menor magnitud, superando levemente los 2 m de altura. Además, se observa una segunda semana con una agitación menor que en anteriores casos y la última semana, que se había calificado como período de leve agitación en las demás estaciones, presenta generalmente alturas de ola por debajo de los 0.5 m.

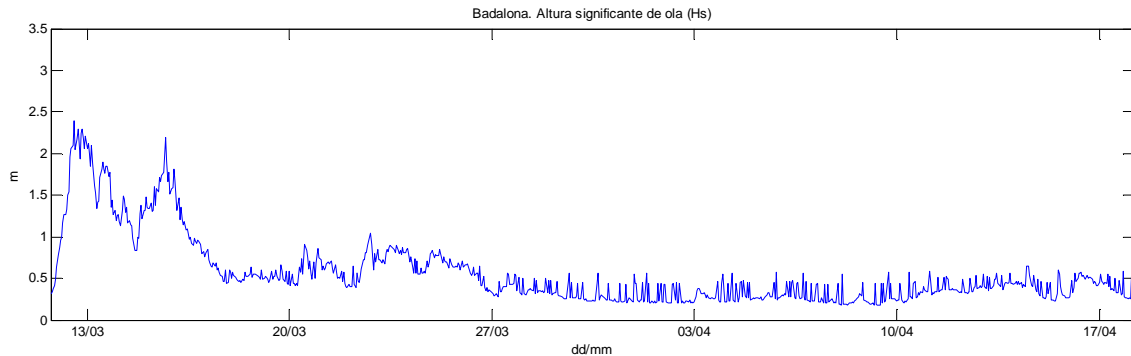


Fig. 132. Badalona. Altura significativa de ola (Hs).

Para esta estación no se dispone de datos correspondientes a alturas máximas de ola ni tampoco de direcciones del oleaje. En cuanto al período de pico, durante la campaña se ha registrado un valor máximo de 11.51 s, mientras que el valor medio es de 7.0 s.

5.3.5. ESTACIÓN LLOBREGAT

En este punto de estudio también se observa la misma pauta de comportamiento que en casos anteriores para la altura significativa de ola, con los dos picos de tormenta de 2.5 m en la primera semana, una segunda semana con menor agitación y alturas de ola entre 0.5-1.5 m, dos semanas de relativa calma y una última semana de leve oleaje energético que supera 1 m de altura (Fig. 133).

La altura máxima de ola registrada fue de 4.59 m, mientras que el máximo período de pico es de 10.5 s. El período de pico medio se sitúa en los 6.0 s.

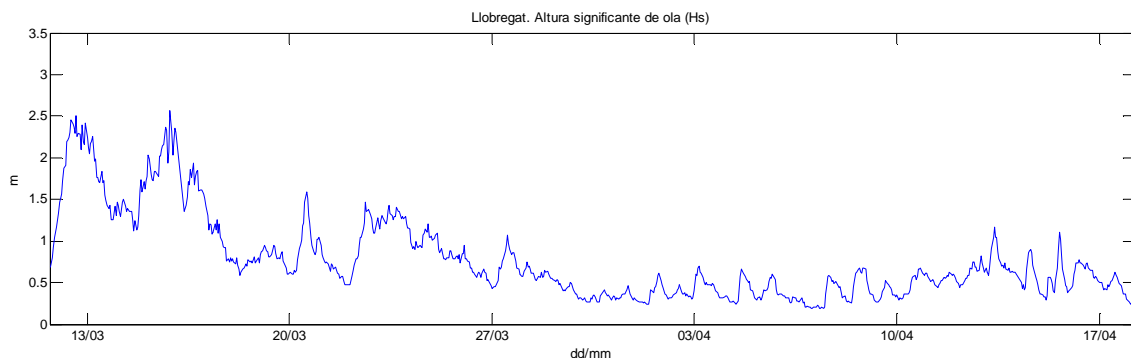


Fig. 133. Llobregat. Altura significativa de ola (Hs).

Tal como se aprecia en la Fig. 134, las rosas de oleaje muestran de nuevo un oleaje más energético proveniente del Este y el ESE, mientras que el oleaje de menor intensidad tiende a propagarse también desde el Sur, en este caso más concretamente desde el SSO y el SO.

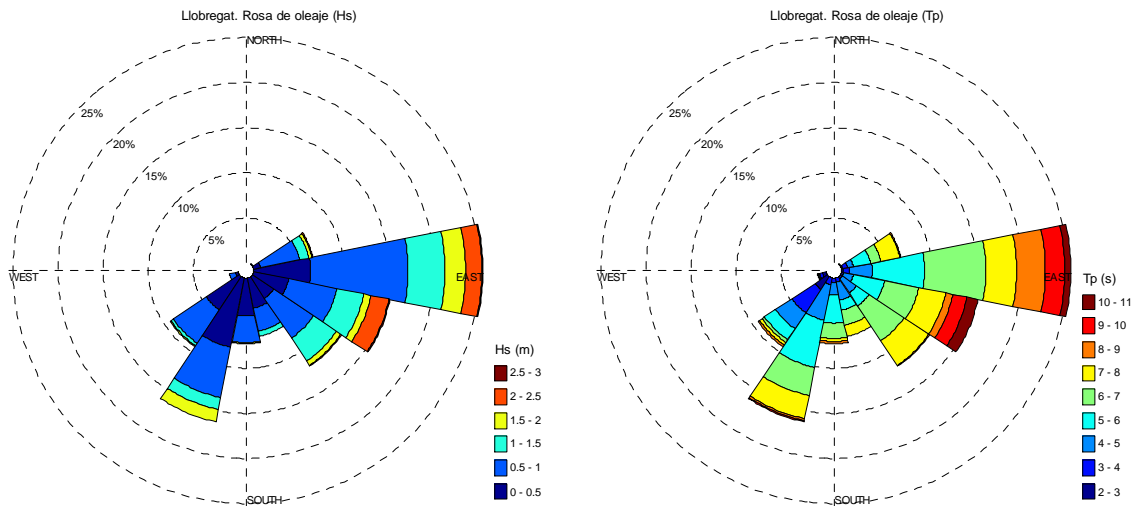


Fig. 134. A3. Rosas de oleaje para la altura significativa de ola (izq.) y el período de pico (dcha.).

5.3.6. SÍNTESIS

Tras analizar todos los datos de oleaje disponibles, es fácil describir el comportamiento del oleaje durante la campaña, debido a las grandes coincidencias que se observan entre puntos de estudio. De la misma manera que ha ocurrido en la síntesis correspondiente al comportamiento de las corrientes durante la campaña, se observan también cuatro etapas diferenciadas.

Durante la primera semana, como ya se mencionado, se observa un oleaje muy energético provocado por temporales de tormenta que tiene su punto álgido en los días 12 y 15 de Marzo, cuando se registran las mayores alturas de ola. En cuanto a la orientación, el oleaje durante este período proviene totalmente del Este y el ESE.

Tras este período, durante la segunda semana se registra una disminución en la agitación costera aunque el mar todavía no se encuentra en estado de calma, con oleaje todavía propagándose preferentemente desde el Este y con alturas de ola que rondan los 1-1.5 m.

La tercera y cuarta semana se pueden definir como períodos en los que el mar se encuentra en calma, con oleaje que no supera apenas los 0.5 m y que se propaga también desde direcciones secundarias como el Sur y el SO.

En la última semana se aprecia un ligero aumento en la energía del oleaje generando alturas que superan el metro de altura.

5.4. TURBIDEZ

A continuación se representan los valores obtenidos por los turbidímetros y los OBS de ambas estaciones, localizando los picos e incrementos relativos que presentan para definir los períodos en los que se produjo más turbidez. Después, se representaran conjuntamente los datos de estas dos estaciones para localizar los períodos comunes en los que se registraron niveles altos de partículas en suspensión.

5.4.1. ESTACIÓN A1

Los datos registrados por el turbidímetro en este punto de estudio, representados en el lado izquierdo de la Fig. 135, muestra valores altos durante la primera semana, como era de esperar, debido a las acciones hidrodinámicas que tienen lugar durante ese mismo período. Se distinguen claramente dos picos que alcanzan los 60 y 100 FTU respectivamente, mientras que a principios de la segunda semana se observa un leve repunte que alcanza los 20 FTU. Durante el resto de la campaña no se observa ningún incremento relativo más, ya que la subida que se produce durante finales de la última semana se debe presumiblemente a la suciedad acumulada por el aparato.

Pasando a la representación de los datos de concentración de sedimento en suspensión, que se puede observar en el lado derecho de la Fig. 135, se aprecian de nuevo dos incrementos durante la primera semana, rozando los 2 y 6 g/L respectivamente. Durante la segunda semana no se aprecia nada en especial, mientras que a finales de la tercera y sobre todo durante la cuarta se observan tres períodos con incrementos leves. En el primero se observa un pico de 4 g/L, el segundo son sucesiones de subidas y bajadas que alcanzan los 2 g/L, mientras que en el tercero se puede apreciar un pico de 6 g/L.

5.4.2. ESTACIÓN A2

La Fig. 136 muestra las representaciones correspondientes a este punto de estudio. En los datos proporcionados por el turbidímetro se observan picos en tres períodos diferenciados durante la primera semana. El primero alcanza los 60 FTU, mientras que los dos siguientes, que podrían haberse agrupado en uno mismo, llegan a los 50 y 60 FTU respectivamente. Obviamente, estos valores deberán ser tenidos en cuenta como incrementos y no como valores absolutos, como se verá en el apartado siguiente. A partir de la tercera semana, y hasta el final de la campaña, existe un incremento continuo, previsiblemente debido a la suciedad acumulada en el instrumento. Sin embargo, llaman la atención dos períodos durante la cuarta semana en los que se presentan incrementos de 40 FTU, de igual magnitud que los de la primera semana.

La serie correspondiente a la concentración de sedimentos en suspensión, muestra un ligero incremento de unos 1.5 g/L al empezar la campaña, mientras que acto seguido se presenta un pico muy pronunciado que alcanza los 8 g/L. Al final de la tercera semana se observa un ligero incremento, mientras que durante la última semana se observa un largo período de concentraciones altas, sin estar muy claro si fue un incremento real o acumulación de suciedad.

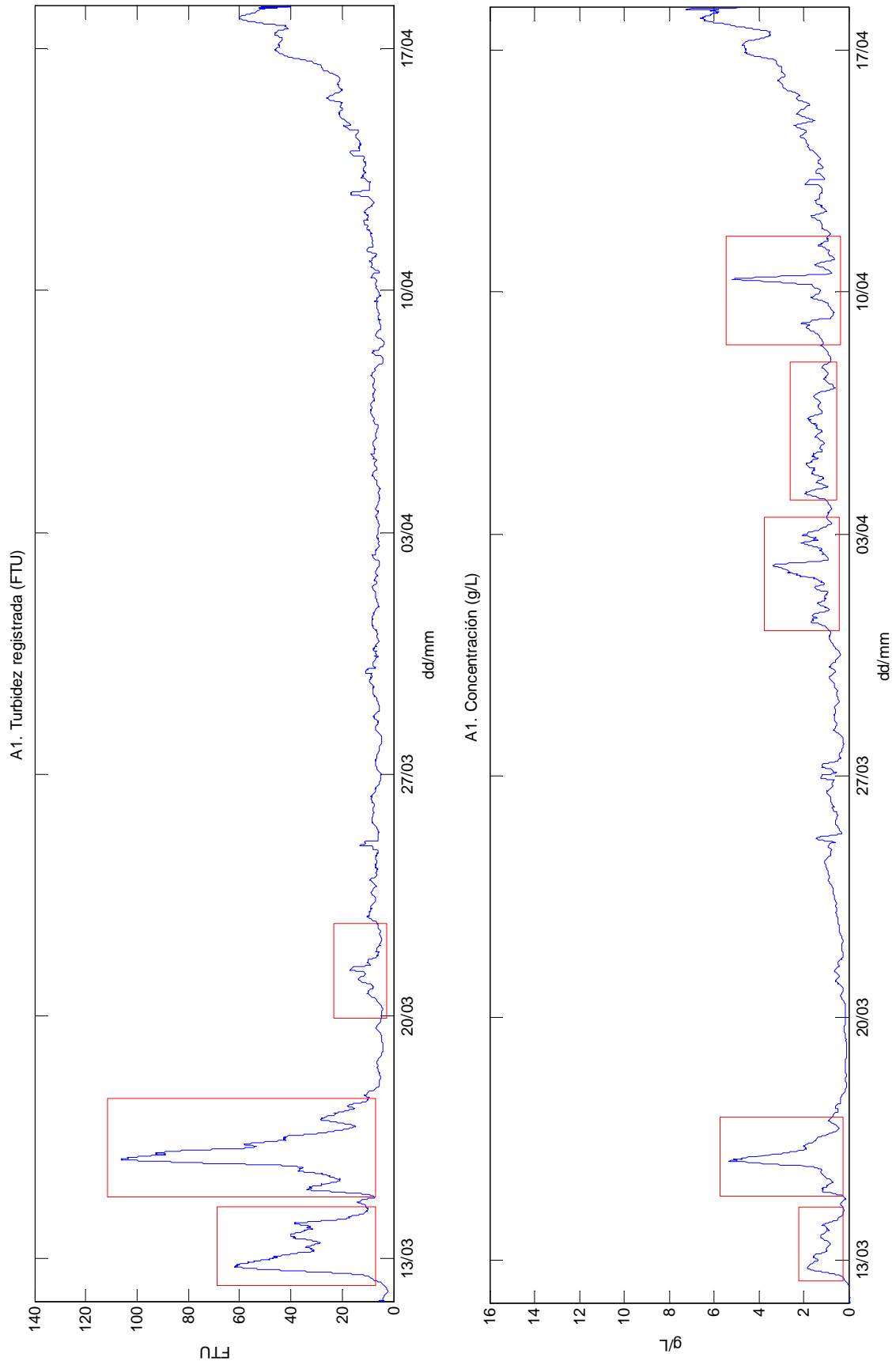


Fig. 135. A1. Turbidez (FTU) (izq.) y concentración de sedimentos en suspensión (g/L) (dcha.).

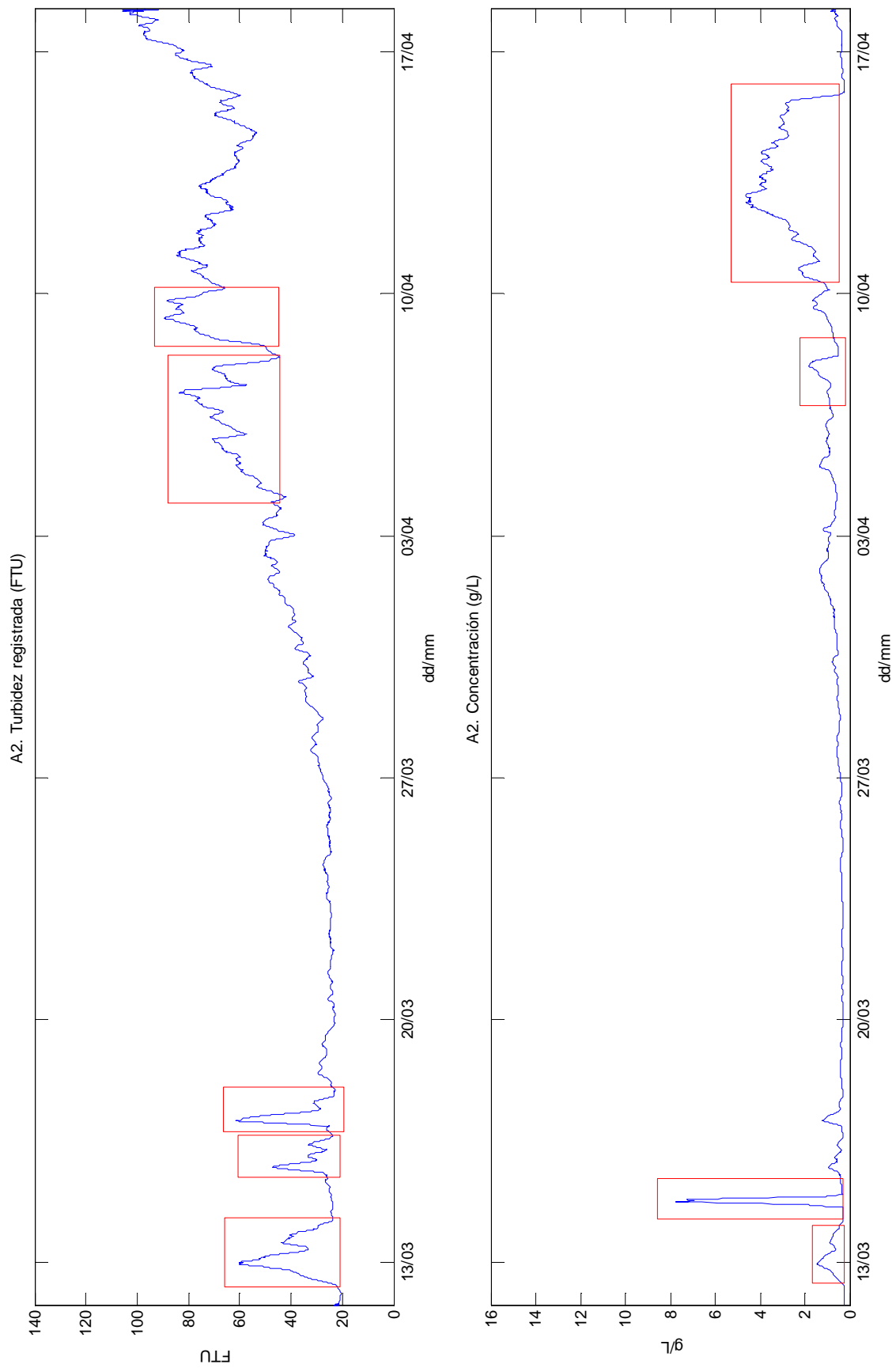


Fig. 136. A2. Turbidez (FTU) (izq.) y concentración de sedimentos en suspensión (g/L) (dcha.).

5.4.3. SÍNTESIS

Una vez analizados por separado los datos de turbidez proporcionados, en la Fig. 137 se representan conjuntamente los datos de ambas estaciones.

Como se puede observar en el gráfico de la izquierda, correspondiente a los datos proporcionados por los turbidímetros, ambos puntos de estudio registran incrementos en la turbidez durante la primera semana de agitación, único período en el que se asemeja su comportamiento. Además, también coinciden en la diferenciación de dos períodos independientes.

Sin embargo, en el gráfico de la derecha, correspondiente a la concentración de sedimentos en suspensión, los valores registrados muestran actividad semejante, además de en los dos períodos iniciales, a partir de mediados de la tercera semana y hasta el final de la campaña. Se trata de tres períodos diferenciados en los que se observan altibajos en los valores, mostrando cierta irregularidad los dos primeros, mientras que en el último se observan incrementos muy significativos.

Al disponer de cuatro series de datos, dos correspondientes a los turbidímetros y otras dos a los OBS, se ha considerado conveniente realizar una tabla resumen en la que se indican los incrementos más significativos y diarios registrados (Tabla 6).

Como se puede ver, los días 12 y 15 de Marzo los cuatro instrumentos registraron un gran aumento de la turbidez. Destaca sobre todo el incremento captado por los instrumentos de la estación A1, mientras que en el punto de estudio A2 no fue tan pronunciado este fenómeno.

El dato correspondiente al 14 de Marzo de la estación A2 no se deberá tener en cuenta ya que el resto de instrumentos no captaron tales incrementos. Se podría pensar que ese dato se debiera a las descargas de lluvia del río Besòs, debido a su proximidad, pero como se verá más adelante estas tienen lugar durante los días 12 y 15 de Marzo. Así pues, se deberá atribuir a algún otro factor externo como podría ser el paso de algún animal u objeto.

Los días 13 y 17 de Marzo, días próximos a los anteriores, se siguen registrando incrementos relativos de partículas en suspensión, aunque en este caso de menor magnitud y captados tan sólo por tres de los instrumentos.

Durante la segunda y tercera semana no se encuentran incrementos relativos significativos, pero durante la cuarta semana algunos instrumentos registraron aumentos de la turbidez. Es el caso de los días 6, 7, 10 y 12 de Abril, en los que al menos dos de los instrumentos captaron este fenómeno.

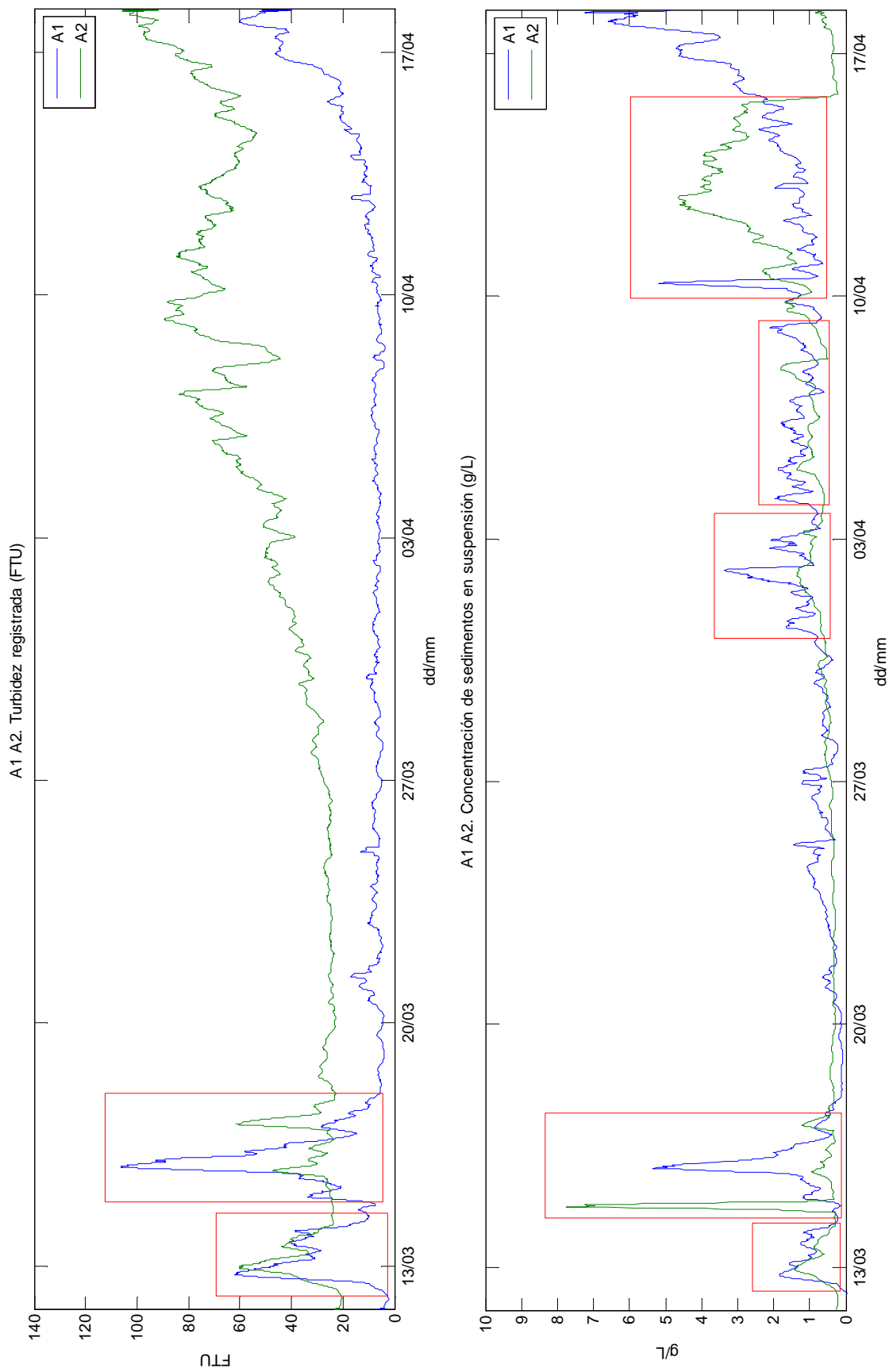


Fig. 137. A2. Turbidez (FTU) (izq.) y concentración de sedimentos en suspensión (g/L) (dcha.).

	TURBIDÍMETRO		OBS	
	A1 (FTU)	A2 (FTU)	A1 (g/L)	A2 (g/L)
11/03				
12/03	59	38	1.9	1.3
13/03	11	8	0.4	
14/03				6.2
15/03	93	18	4.8	0.4
16/03				
17/03		36	0.3	0.6
18/03				
19/03				
20/03				
21/03	10			
22/03				
23/03				
24/03				
25/03				
26/03				
27/03				
28/03				
29/03				
30/03				
31/03			0.8	
01/04				
02/04			2.4	
03/04			1.0	
04/04			0.9	
05/04		12		
06/04		23	0.5	
07/04		8		0.7
08/04			1.4	
09/04		18		
10/04			4.3	0.7
11/04				
12/04			0.7	0.8
13/04				
14/04				
15/04				
16/04				
17/04				
18/04				

Tabla 6. Resumen diario de turbidez y concentración de sedimentos en suspensión.

5.5. METEOROLOGÍA

Como se ha visto anteriormente, es importante conocer también las condiciones meteorológicas que se produjeron durante la campaña. A continuación se muestra un análisis de las mismas utilizando las series de datos disponibles.

5.5.1. ESTACIÓN BADALONA

Para este punto de estudio se disponen de datos de viento y precipitaciones.

En la Fig. 138 se puede apreciar como la velocidad del viento es más alta durante el principio de la primera semana, observándose dos picos que rondan los 12-14 m/s y que seguramente se correspondan con el oleaje registrado en los mismos períodos. Además, se mantienen velocidades altas de viento entre los 8-12 m/s durante estos episodios. También existe otro pico pronunciado de semejante magnitud (12-14 m/s) durante la segunda semana, período en el que las velocidades del viento no bajan de los 4 m/s. En el resto de la campaña no se pueden observar claramente otros períodos diferenciados, puesto que existe una gran variación de velocidades, alternando períodos de calma con períodos de velocidades de intensidad media (6-10 m/s).

En cuanto a las direcciones de procedencia del viento, como se puede observar tanto en la Fig. 138 como en la Fig. 139, existen tres direcciones principales a tener en cuenta. El viento que sopla con más intensidad es sin duda el de Levante (Este), un tanto influenciado también por el Gregal (NE). Para intensidades medias, el viento tiende a proceder del SSO, siendo una mezcla de los vientos Ostro (Migjorn en catalán), de orientación Sur, y Garbí, de orientación SO. Sin embargo, las brisas más leves son producidas por el viento Mistral (NO).

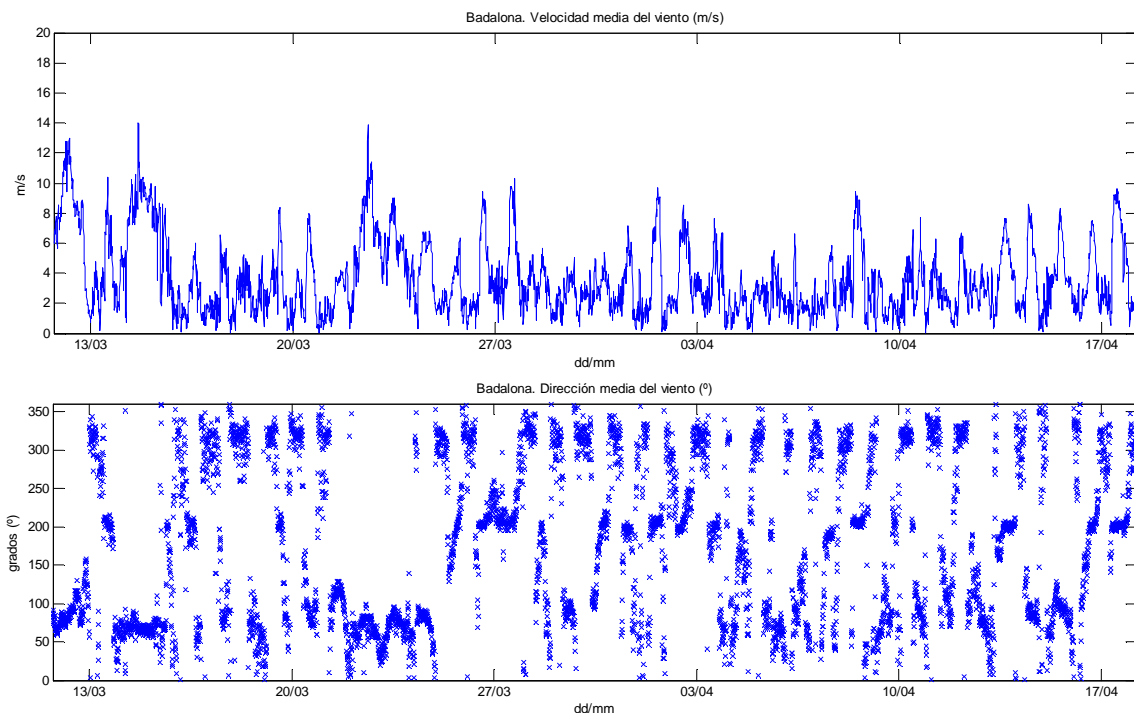


Fig. 138. Badalona. Velocidad y dirección media del viento.

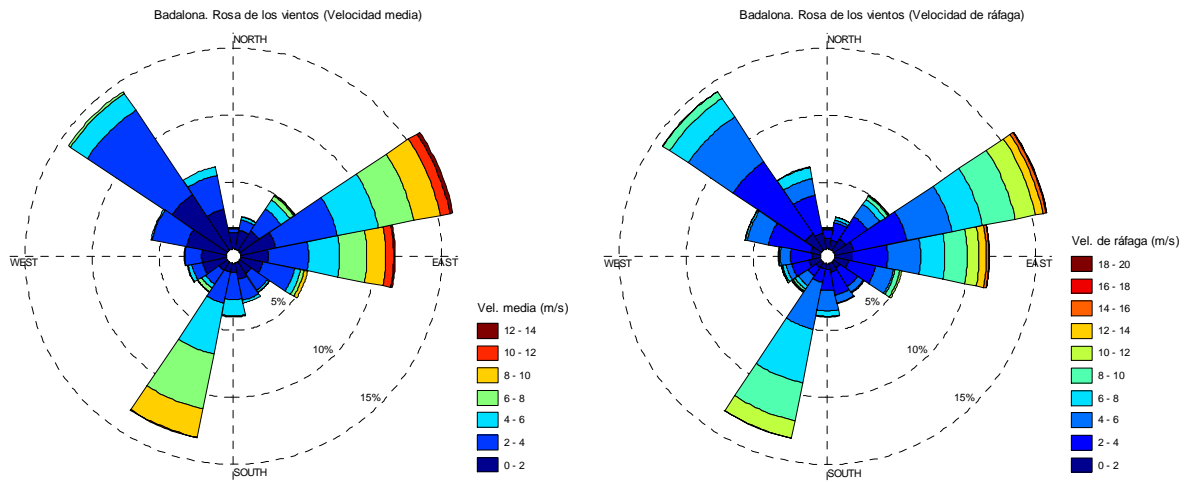


Fig. 139. Badalona. Rosas de los vientos para la velocidad media (izq.) y la velocidad de ráfaga (dcha.).

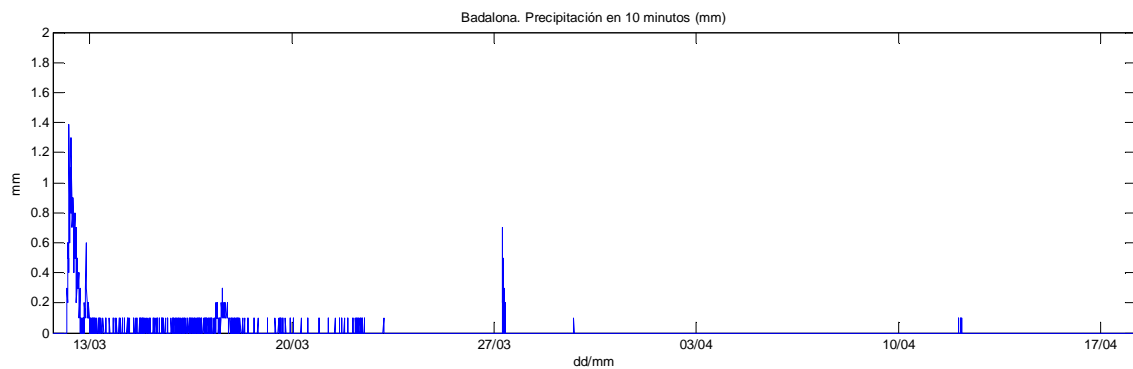


Fig. 140. Badalona. Precipitación en 10 minutos.

En este punto de estudio también se dispone de información relacionada con las precipitaciones producidas durante la campaña (Fig. 140).

A principios de la primera semana, concretamente durante el día 12 de Marzo, se registraron fuertes precipitaciones que alcanzaron valores de 1.4 mm (l/m^2) durante 10 minutos, disminuyendo este valor a lo largo del día. Durante los días restantes de esta primera semana se observan lluvias débiles pero continuas. A medida que avanzaba la segunda semana de campaña estas lluvias fueron más intermitentes hasta que a mediados de la misma desaparecieron por completo. Destacan también las precipitaciones caídas durante el día 27 de Marzo alcanzando los 0.7 mm en 10 minutos.

5.5.2. ESTACIÓN LLOBREGAT

Para este punto de estudio se dispone únicamente de datos de velocidades y dirección del viento.

De la misma manera que sucede en la estación anterior, durante la primera semana de la campaña se observan dos períodos diferenciados de vientos intensos en los que se alcanzan velocidades en torno a los 8-10 m/s (Fig. 141). Estos dos períodos corresponden a las dos tormentas iniciales mencionadas en apartados anteriores. Durante la segunda semana también se distingue un período de vientos fuertes en el que vuelven a reproducirse valores sobre los 8-10 m/s. En el resto de la campaña existe una gran variación, ya que se observan períodos en los que el viento alterna velocidades medias y brisas ligeras.

Pasando ya al análisis de las direcciones principales de donde sopla el viento, en este caso existe una mayor variedad que en la estación anterior (Fig. 142), posiblemente causada por encontrarse bastante más alejado de la costa este punto de estudio. Las mayores intensidades están relacionadas con el viento Gregal (NE) y Levante (Este) en menor parte. Sin embargo, las intensidades medias y bajas están repartidas de forma muy parecida entre los vientos Garbí (SO) y Mistral (NO).

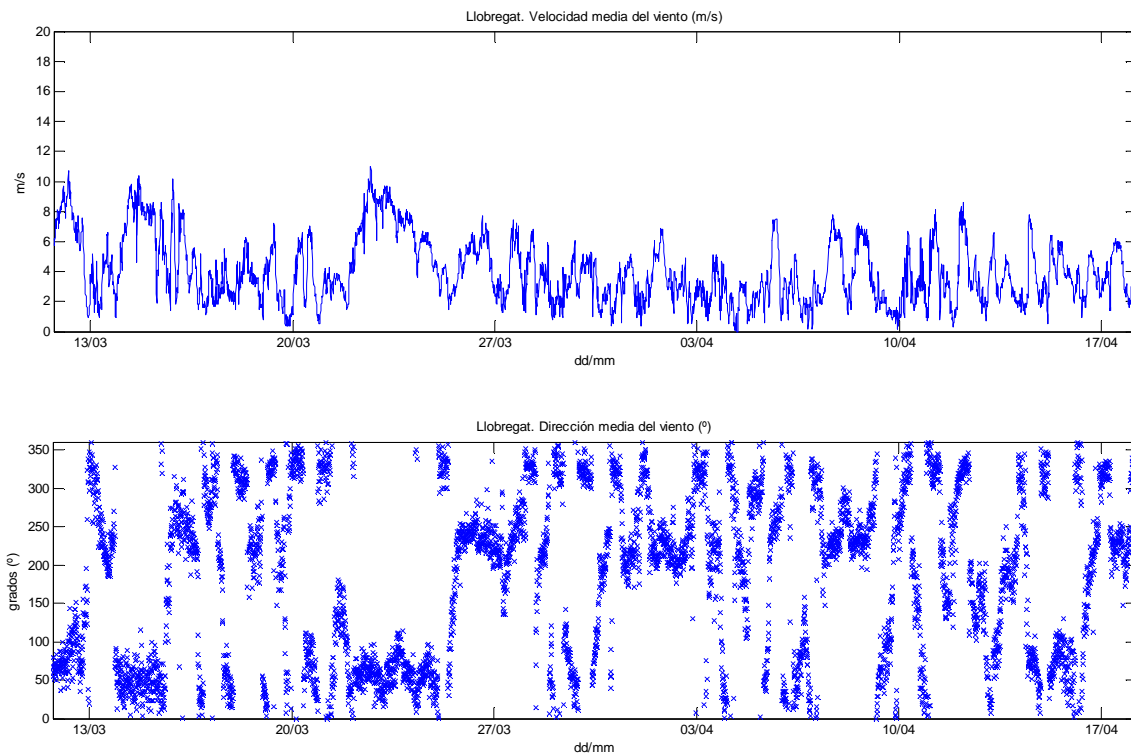


Fig. 141. Llobregat. Velocidad y dirección media del viento.

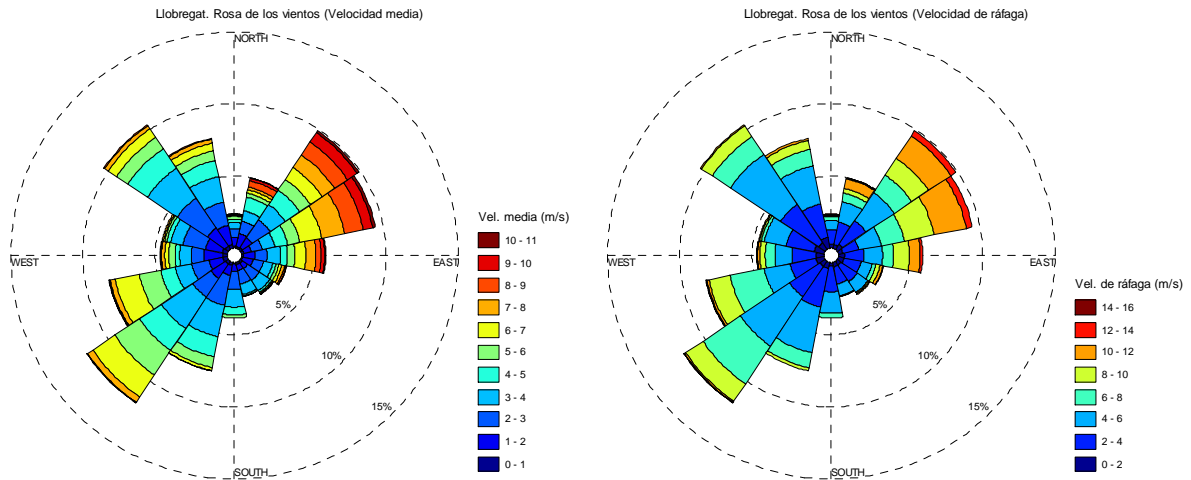


Fig. 142. Llobregat. Rosas de los vientos para la velocidad media (izq.) y la velocidad de ráfaga (dcha.).

5.5.3. SÍNTESIS

Estos últimos datos corroboran la presencia de fuertes tormentas durante el día 12 de Marzo y posteriores. Aunque las precipitaciones más intensas se produjeran ese día, los datos de viento y oleaje durante toda la semana indican la presencia de mala mar en ese período. También se encuentra relación directa entre el oleaje y los vientos que se producen durante la segunda semana, coincidiendo en dirección e intensidad. Además, de la misma manera que sucede en el oleaje, los vientos de alta intensidad soplan desde Levante, ocasionando las populares *llevantades*. Sin embargo, los vientos de menor intensidad se reparten entre el Garbí-Migjorn (SO-S) y el viento Mistral (NO). (Estas direcciones principales ya se avanzaron en el apartado 2.3.3.1.)

5.6. DESCARGAS CONTINENTALES

Para lograr entender los fenómenos que provocan la resuspensión de los sedimentos es necesario conocer también variables importantes como, por ejemplo, los caudales de descarga del río Besòs y de los aliviaderos situados a lo largo de la costa, ya que los episodios de lluvia tendrán efecto en los valores de concentración de sedimento suspendido que miden los OBS.

Así pues, en la Fig. 143 se representan estos caudales, que deberán ser tenidos en cuenta en el análisis final.

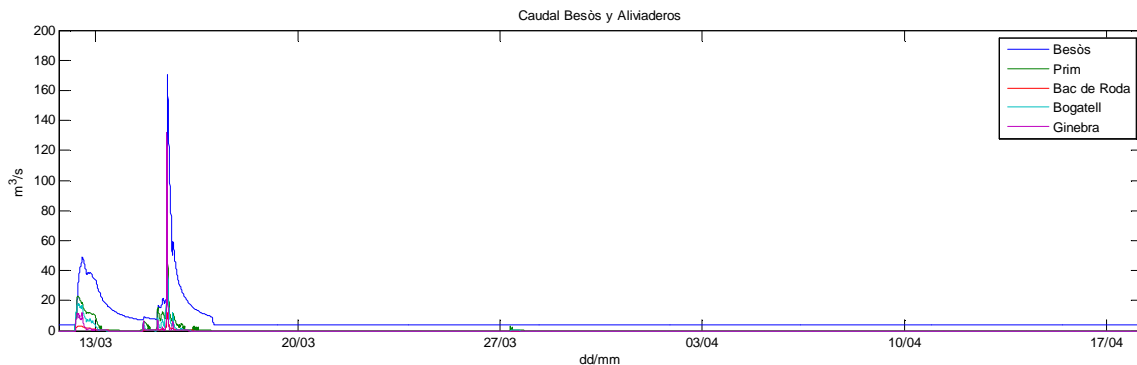


Fig. 143. Caudales de descarga registrados para el río Besòs y los aliviaderos.

De este gráfico se desprenden con claridad los episodios de lluvias que se produjeron durante la primera semana. El caudal del río Besòs alcanza dos picos, el primero de unos 50 m³/s durante los primeros días de campaña, y el segundo, mucho más pronunciado que el anterior, de unos 170 m³/s durante mediados de la primera semana. Los caudales de descarga de los aliviaderos se comportan de la misma manera durante los mismos días. A partir de mediados de la primera semana, se debe tener muy en cuenta la ausencia de lluvias para el posterior análisis.

6. ANÁLISIS DE LA RESUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará un estudio que tratará de identificar los principales agentes y factores que producen la resuspensión de los sedimentos de la zona. Se analizarán las tensiones de corte sobre el fondo resultantes de la acción de las corrientes y el oleaje tanto por separado como en conjunción, y se realizará una comparativa con las concentraciones de sedimento en suspensión, teniendo en cuenta también el resto de factores externos que participan en este fenómeno.

Con este fin, se procederá a utilizar los conjuntos de datos disponibles para calcular dichas tensiones en cada uno de los puntos de estudio que así lo permitan. Sin embargo, como ya se ha expuesto con anterioridad, sólo se dispone de datos de concentración de sedimento en suspensión para las estaciones A1 y A2, por lo que el análisis tendrá un carácter meramente cualitativo.

6.2. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO

A continuación se detalla el procedimiento seguido para calcular las tensiones de corte sobre el fondo asociadas a la corriente y al oleaje, para después encontrar las tensiones generadas bajo la acción combinada de ambos fenómenos hidrodinámicos mediante el modelo propuesto por Soulsby (1993).

6.2.1. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO ASOCIADAS A LA CORRIENTE

Para el cálculo de estas tensiones se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\tau_c = \rho \cdot C_D \cdot u_c^2 \quad (9)$$

donde ρ es la densidad media del agua del mar ($\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$), u_c es la velocidad de la corriente cerca del fondo (conocida), y C_D es el coeficiente arrastre.

El coeficiente de arrastre C_D es función de la profundidad total del punto de estudio (h) y de la longitud de rugosidad total en el fondo (z_0), participando también en la expresión la constante de Von Karman ($k = 0.4$):

$$C_D = k^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z_0 + 0.5 \cdot h}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

Así pues, la profundidad h dependerá del punto de estudio en el que estemos calculando las tensiones. En el caso de la longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) se ha tomado como referencia los valores medios propuestos por Soulsby (1983) para calcular estas tensiones, que dependen del material del que está compuesto el fondo, tal como muestra la Tabla 7.

Material del fondo	z_0 (mm)
Lodos	0.2
Lodos / Arena	0.7
Limos / Arena	0.05
Arena (sin ripples)	0.4
Arena (con ripples)	6
Arena / Conchas	0.3
Arena / Gravas	0.3
Lodos / Arenas / Gravas	0.3
Gravas	3

Tabla 7. Valores medios de z_0 para distintos materiales de fondo.

Cabe mencionar que la altura sobre el lecho marino a la que se evalúa el coeficiente de arrastre C_D debería ser en realidad $0.37 \cdot h$, altura en la que la velocidad media de la corriente toma un perfil logarítmico. Sin embargo, se opta por la expresión (10) ya que la diferencia del valor de C_D entre ambas formulaciones es normalmente menor del 10%, y la incertidumbre en la elección del valor de z_0 es mucho mayor (Umgiesser et al., 2004). En el apartado 6.3 se detalla el valor de z_0 escogido para cada punto de estudio.

6.2.2. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO ASOCIADAS AL OLAJE

El cálculo de las tensiones de corte sobre el fondo originadas únicamente por el oleaje se realiza siguiendo la expresión:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot u_w^2 \quad (11)$$

donde ρ es la densidad media del agua del mar ($\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$), u_w es la velocidad horizontal máxima de la partícula de agua en el fondo, la cual se calculará utilizando la teoría lineal del oleaje, y f_w es el coeficiente de fricción del oleaje.

El coeficiente de fricción f_w se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$f_w = 1.39 \cdot \left(\frac{z_0}{A} \right)^{0.52} \quad (12)$$

en la que z_0 es la longitud de rugosidad total en el fondo escogida para los cálculos anteriores (Eq. 10), y A es la amplitud de la trayectoria de la partícula de agua predicha por la teoría lineal.

Esta amplitud A se calcula como:

$$A = \frac{u_w \cdot T_p}{2\pi} \quad (13)$$

donde T_p es el período de pico del oleaje (conocido) y u_w , incluida también en la Eq. 11, se calcula usando la formulación de la teoría lineal:

$$u_w = \frac{\pi \cdot H}{T_p} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)} = \frac{\pi \cdot H}{T_p} \cdot \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot h\right)} \quad (14)$$

Dado que la altura de ola $H = H_s/\sqrt{2}$ y el período de pico T_p son conocidos, para la Eq. 14 sólo es necesario calcular mediante iteración la longitud de onda L para aguas intermedias:

$$L = \frac{g \cdot T_p^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot h\right) \quad (15)$$

en la que g toma el valor de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) y h es la profundidad total en el punto de estudio.

6.2.3. TENSIONES DE CORTE SOBRE EL FONDO COMBINADAS

Para calcular las tensiones de corte sobre el fondo derivadas de los flujos combinados de oleaje y corriente pueden utilizarse varios modelos, entre los que se encuentran Madsen y Grant (1979, 1982), Fredsøe (1981), Bijker (1971) o Soulsby (1993). Este último modelo ha sido el empleado para encontrar dichas tensiones.

Soulsby (1993) propone una aproximación algebraica para las tensiones de corte sobre el fondo generadas bajo la acción combinada de olas y corrientes (con una aproximación de $\pm 5\%$ en la mayoría de los casos). Esta aproximación se traduce en el cálculo de la tensión media de fondo bajo la expresión:

$$\tau_m = \tau_c \cdot \left[1 + 1.2 \cdot \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (16)$$

donde τ_c y τ_w son respectivamente las tensiones de corte que se derivan de la acciones de la corriente y del oleaje por separado, calculadas anteriormente.

La expresión correspondiente a las tensiones de corte sobre el fondo máximas τ_{max} viene dada por la suma vectorial de τ_w y τ_m :

$$\tau_{max} = [(\tau_m + \tau_w \cdot \cos \phi)^2 + (\tau_w \cdot \sin \phi)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

donde ϕ representa el ángulo que encierra la dirección de la corriente y la dirección de propagación del oleaje.

Siendo la tensión de corte máxima τ_{max} , y no la tensión media τ_m , la responsable de la resuspensión de los sedimentos del fondo, los resultados del apartado 6.3. serán comentados en términos de las tensiones máximas calculadas en la Eq. 17.

6.2.4. TENSION DE CORTE CRÍTICA

A continuación se detallan los cálculos realizados para encontrar las tensiones de corte críticas correspondientes a los sedimentos situados bajo los cinco puntos de estudio.

Shields (1936) desarrolló una metodología para calcular la tensión de corte mínima necesaria para iniciar el movimiento de las partículas sumergidas en un fluido.

El parámetro de Shields θ_{cr} se define como:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D} \quad (18)$$

donde τ_{cr} es la tensión de corte crítica, g es la gravedad terrestre ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), ρ_s es la densidad del grano, ρ es la densidad del agua y D es el diámetro mediano del grano D_{50} .

El tamaño de grano adimensional D_* se define como:

$$D_* = \left[\frac{g \cdot (s - 1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot D \quad (19)$$

donde s corresponde al valor adimensional ρ_s/ρ y v es la viscosidad cinemática del agua ($v = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

El parámetro de Shields se puede relacionar con el tamaño de grano adimensional D_* a través de la curva representada en la Fig. 144.

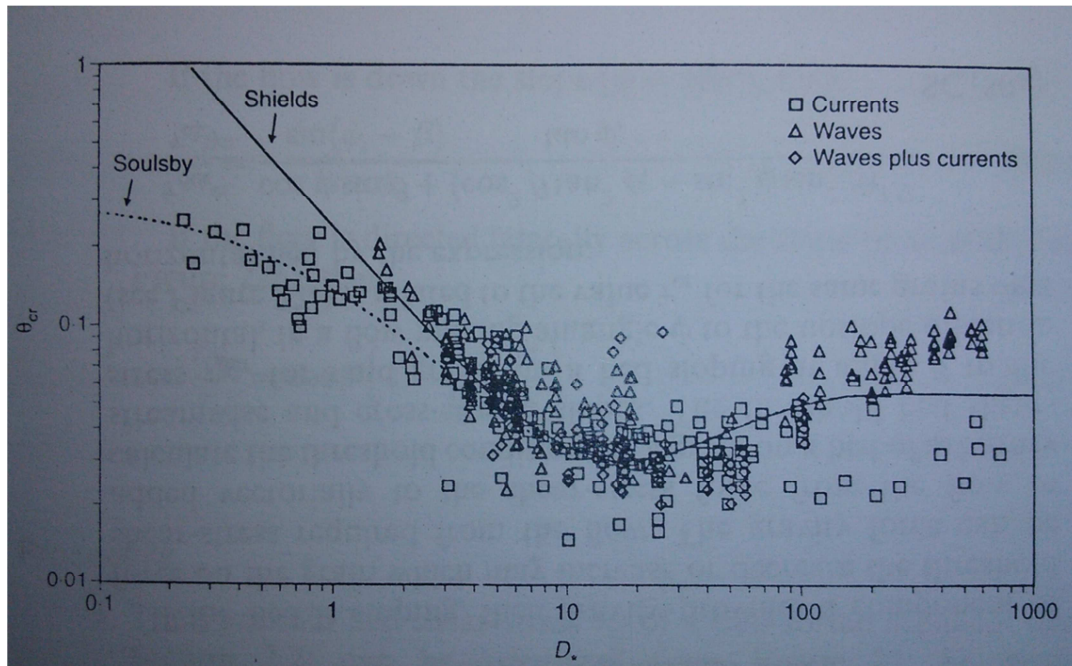


Fig. 144. Umbral de movimiento de las partículas bajo los efectos de oleaje y corrientes.

Fuente: Dynamics of marine sands (Soulsby, 1997).

Sin embargo, Soulsby y Whitehouse (1997) desarrollaron una ecuación que se asemeja a la curva propuesta por Shields:

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2 \cdot D_*} + 0.055 \cdot [1 - \exp(-0.020 \cdot D_*)] \quad (20)$$

De esta manera, aplicando las ecuaciones (19), (20) y por último (18) se obtienen los resultados finales de la Tabla 8.

Punto de estudio	D_{50} (mm)	τ_{cr} (N/m ²)
A1	0.097	0.123
A2	0.133	0.135
A3	0.01	0.037
Badalona	0.47	0.235
Llobregat	0.14	0.137

Tabla 8. Tensiones de corte críticas en el fondo para cada uno de los puntos de estudio.

6.3. RESULTADOS

En este apartado se exponen los resultados obtenidos para cada punto de estudio. Se representan las tensiones de corte sobre el fondo asociadas a las corrientes y al oleaje, además de la tensión combinada y la tensión de corte crítica para el inicio del movimiento de las partículas.

6.3.1. ESTACIÓN A1

A continuación, se muestran en la Fig. 145 las tensiones de corte sobre el fondo calculadas para el punto de estudio A1. Según la Tabla 7 (apartado 6.2.1.), y debido a la posición de fondeo de la estación (24 metros de profundidad), se ha considerado oportuno escoger una longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) de 0.2 mm, correspondiente al material del fondo “lodos”, de acuerdo con lo mencionado en el apartado 2.3.5. de la presente tesina, en el que se detallan los tipos de sedimento que se encuentran en el fondo de la plataforma continental de la zona de estudio.

Como se desprende del gráfico, aunque no se vea claramente representada debido al solapamiento con la tensión combinada, la tensión de corte provocada por el oleaje es bastante mayor que la tensión de corte generada por la corriente, tomando la mayor parte del peso en el cálculo de la tensión combinada. La tensión de corte crítica se sitúa sobre los 0.123 N/m² en este punto de estudio.

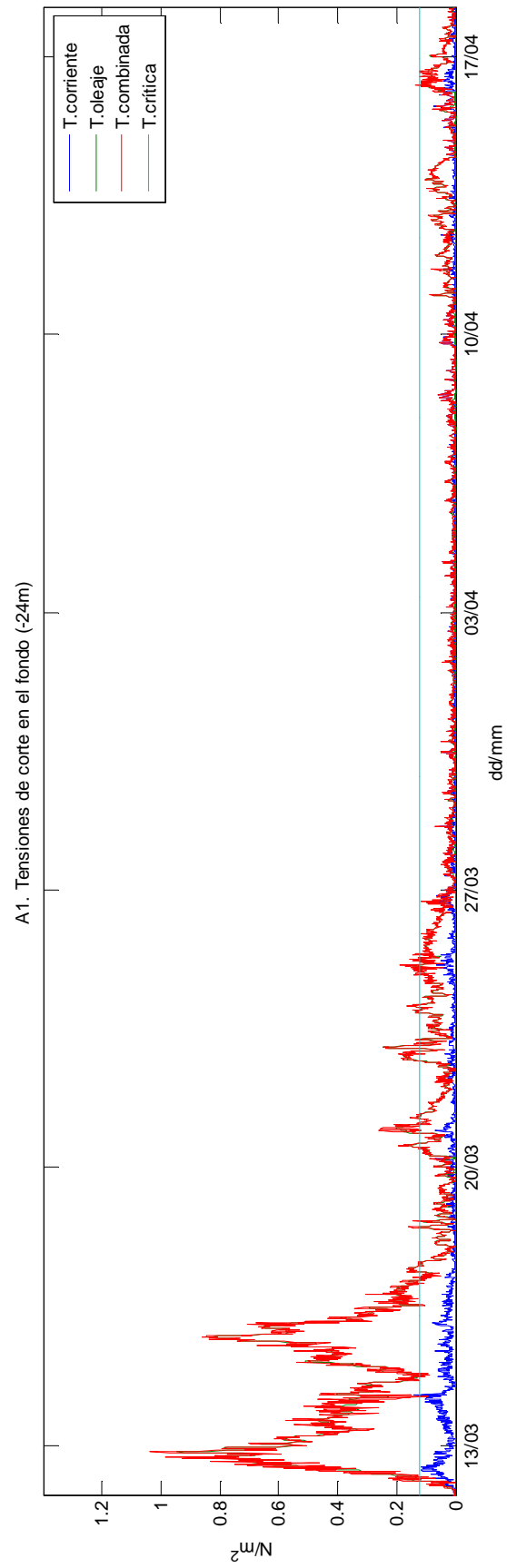


Fig. 145. A1. Tensiones de corte sobre el fondo.

Tanto la tensión de corte generada por el oleaje como la tensión de corte combinada toman valores extremos durante la primera semana, produciéndose dos picos de aproximadamente 0.8 N/m^2 . La tensión de corte provocada por la corriente, en cambio, sólo llega a superar levemente los 0.1 N/m^2 durante este período de agitación. Se produce, por tanto, una gran resuspensión de sedimentos debido al fuerte oleaje durante esa semana.

Durante la segunda semana la tensión de corte producida por el oleaje disminuye significativamente respecto a la primera semana. Sin embargo, se observan períodos puntuales en los que es posible que se produjera una leve resuspensión de partículas.

Las tensiones de corte generadas durante la tercera y cuarta semana son prácticamente negligibles, mientras que en la última semana vuelven a incrementarse, aunque con un valor inferior al de la tensión crítica. En cuanto a la tensión generada por la corriente, se hace prácticamente negligible durante todo el período.

6.3.2. ESTACIÓN A2

En la Fig. 146 se representan las tensiones de corte calculadas para la estación A2. De la misma manera que sucede en la estación anterior, al estar fondeadas ambas a la misma profundidad, se ha escogido una longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) de 0.2 mm , por los mismos motivos que se mencionaron anteriormente.

De este gráfico se sacan prácticamente las mismas conclusiones que para la estación anterior, salvo algún pequeño detalle. Las tensiones de corte generadas por el oleaje y la tensión combinada toman valores que llegan a alcanzar los 1.2 N/m^2 durante los episodios de tormenta de la primera semana. Sin embargo, existe un período muy corto de tiempo durante los días 14-15 de Marzo en el que la tensión de fondo generada por la corriente se asimila a la tensión generada por el oleaje. De la misma manera que en el punto de estudio anterior, durante la primera semana se produjeron las mayores resuspensiones de sedimento.

Durante principios de la segunda semana, se observa como la tensión de corte generada por las corrientes toma protagonismo junto con las generadas por el oleaje, produciendo resuspensiones durante un breve espacio de tiempo.

Las tensiones producidas sobre el fondo son nulas durante las dos semanas siguientes, excepto un pequeño pico provocado por el oleaje a finales de la cuarta semana, sin llegar a producirse resuspensión.

Durante la última semana las tensiones de corte producidas tampoco son suficientes para iniciar el movimiento de las partículas del lecho marino.

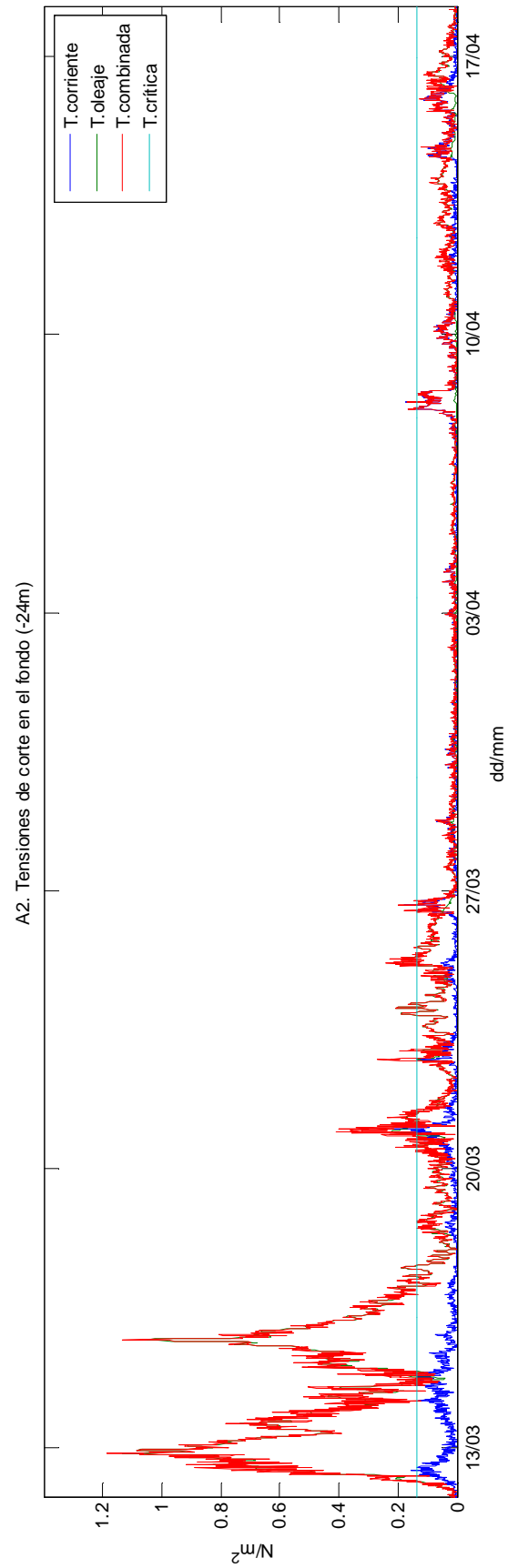


Fig. 146. A2. Tensiones de corte sobre el fondo.

6.3.3. ESTACIÓN A3

Para este punto de estudio se ha escogido también una longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) de 0.2 mm, ya que el material del que se compone el sedimento en el lecho marino es mayoritariamente lodo. La Fig. 147 muestra las tensiones de corte calculadas para la este punto.

A diferencia de los cálculos realizados para las estaciones A1 y A2, los valores de las tensiones generadas por el oleaje, así como también las tensiones de corte combinadas, no alcanzan los 0.4 N/m² en sus picos máximos durante la primera semana. Esto es posiblemente debido a la mayor profundidad a la que se encuentra fondeada esta estación (50 metros), por lo que el oleaje debería ser mucho más energético para poder llegar a alcanzar las tensiones de corte que se daban en anteriores casos. En cuanto a la tensión de corte generada por la corriente, se observa como durante esta primera semana supera fácilmente el umbral de movimiento de las partículas, participando activamente en la resuspensión de las mismas.

Una vez finalizado el período de tormentas, a principios de la segunda semana se observa un repunte de la tensión generada por la corriente que supera la tensión crítica durante un corto período de tiempo, produciendo otra vez resuspensiones de sedimento.

Durante el resto de la campaña, las tensiones de corte son prácticamente inexistentes excepto un pequeño pico a finales de la última semana producido conjuntamente por ambos fenómenos.

6.3.4. ESTACIÓN BADALONA

El valor escogido de longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) para este punto es de 0.5 mm, puesto que el sedimento del lecho marino tiene un mayor diámetro, situándose este a 12 metros de profundidad. En la Fig. 148 se han representado las tensiones de corte calculadas para esta estación.

En este caso, las tensiones de fondo producidas por el oleaje toman valores mucho más extremos al encontrarse el punto de estudio mucho más cerca de la costa y a una profundidad de sólo 12 metros. Estos superan los 3 N/m² en los episodios de tormentas de la primera semana. La tensión de corte generada por la corriente es inapreciable en comparación a la producida por el oleaje. Así entonces, la tensión máxima de corte combinada toma prácticamente el mismo valor que la tensión de corte producida por el oleaje.

Tras el período de tormentas, se observa como durante la segunda semana existe un período de continua resuspensión de sedimentos causada por la acción del oleaje. Sin embargo, durante la tercera y cuarta semana no existe apenas tensión de corte sobre el fondo marino.

En la última semana, la acción del oleaje vuelve a producir pequeñas resuspensiones al aumentar la tensión de corte que genera sobre el fondo.

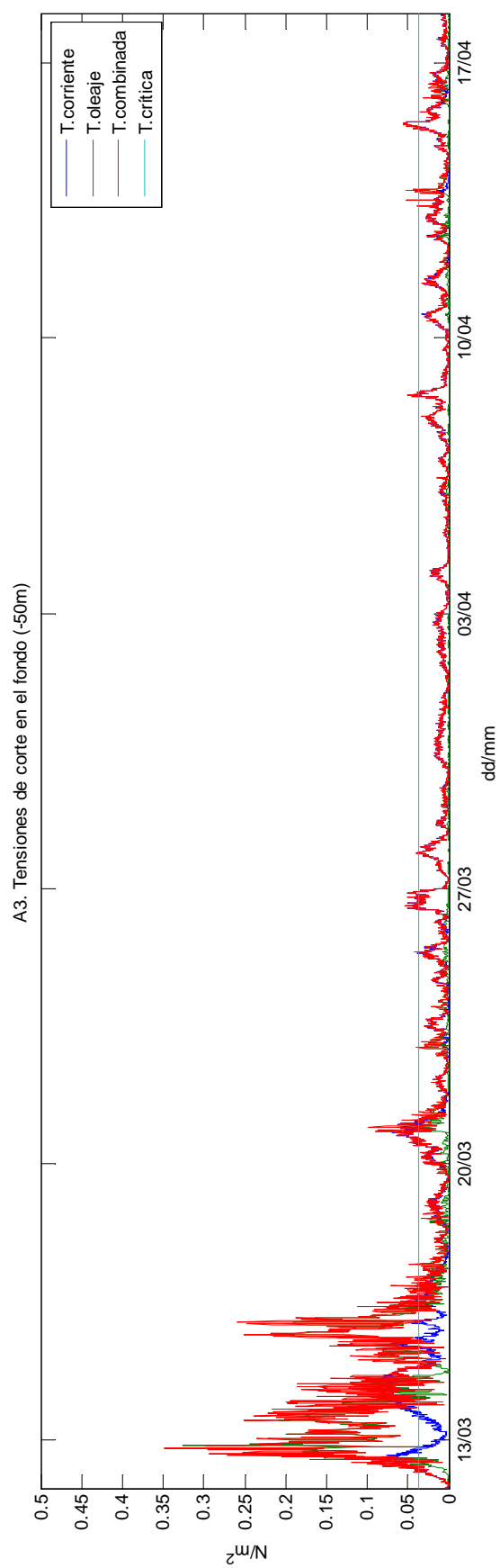


Fig. 147. A3. Tensiones de corte sobre el fondo.

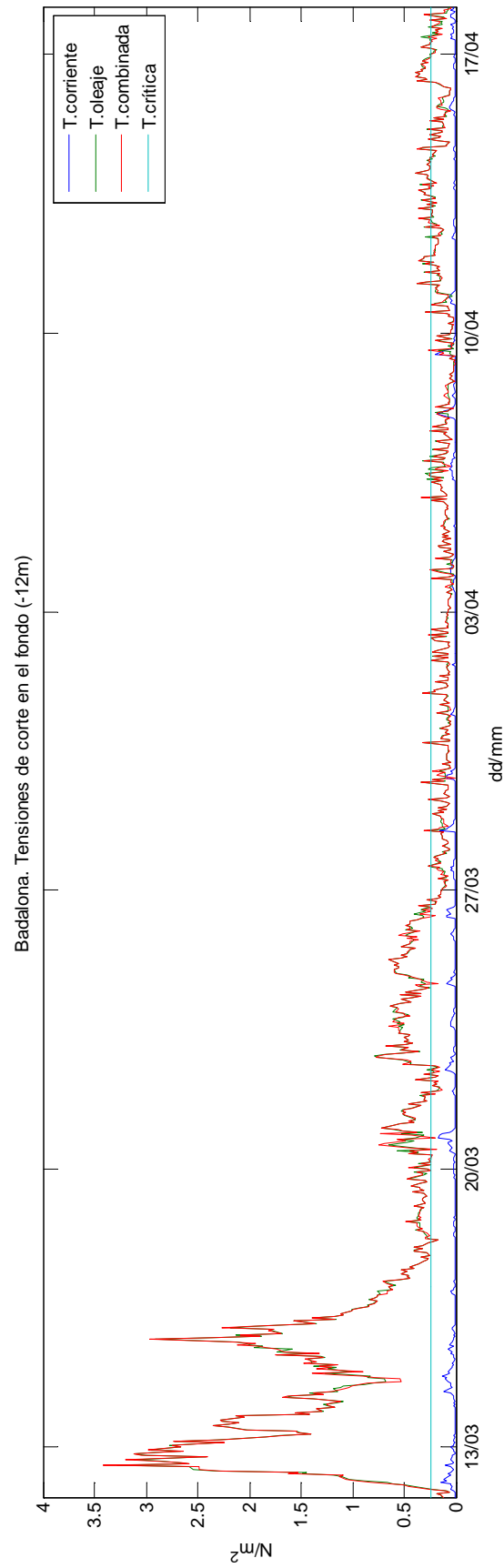


Fig. 148. Badalona. Tensiones de corte sobre el fondo.

6.3.5. ESTACIÓN LLOBREGAT

Para esta estación no se ha considerado lógico representar las tensiones de corte generadas por la corriente. Esto es debido a que los datos más profundos disponibles se encuentran a 15 metros de profundidad, situándose el lecho marino 30 metros por debajo. Por ello, sólo se han analizado las tensiones de fondo generadas por el oleaje.

Para el cálculo de las tensiones de fondo producidas por el oleaje, se ha tomado un valor de longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) de 0.2 mm, como en los 3 primeros puntos de estudio. La Fig. 149 muestra únicamente la tensión de corte producida por el oleaje, como se ha comentado anteriormente, junto con la tensión de corte crítica.

De la misma manera que sucedía en el punto de estudio A3, las tensiones de fondo producidas por el oleaje toman valores mucho más bajos que en las estaciones A1, A2 y sobre todo Badalona. El hecho de estar situado en un punto de semejante calado (45 metros) hace que las tensiones de corte producidas en el fondo no sean muy altas. Estas toman unos valores máximos de entre 0.7 y 0.8 N/m² durante los episodios de tormenta, que serán los únicos períodos en los que se supere la tensión crítica y, por tanto, se produzca resuspensión de sedimentos.

Una vez finalizado el episodio de tormentas, esta tensión adquiere unos valores prácticamente inapreciables.

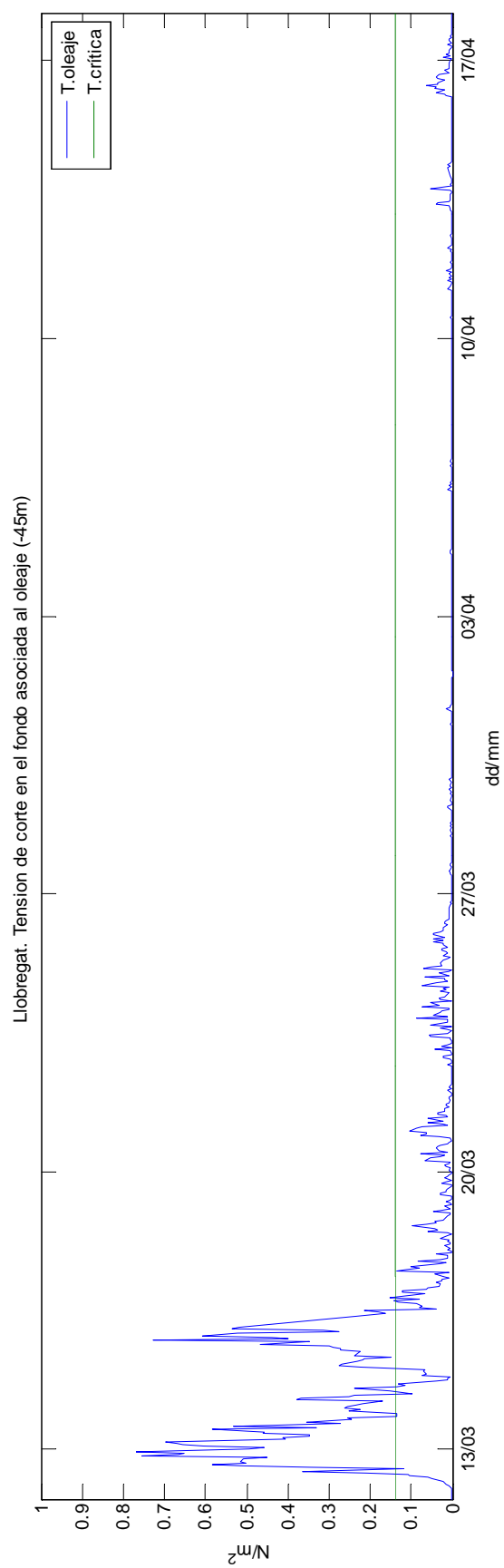


Fig. 149. Llobregat. Tensiones de corte sobre el fondo.

6.4. COMPARATIVA

En este apartado se procederá a realizar una comparativa día por día de las tensiones de corte calculadas y las concentraciones de sedimentos en suspensión registradas. Además, se indicará la presencia o inexistencia de descargas continentales a fin de aclarar si las acciones del oleaje y las corrientes son o no los únicos factores que producen turbidez.

En la Tabla 9 se muestran, para cada punto de estudio, los días en los que las tensiones de corte sobre el fondo asociadas al oleaje y la corriente se encuentran por encima de la tensión de corte crítica. De esta manera se podrá definir qué días se produjo resuspensión de sedimentos, que factor/es lo causó y compararlos con los días en los que se midieron incrementos de turbidez.

Se han diferenciado los días en los que la resuspensión duró más o menos tiempo. La leyenda indica el porcentaje del tiempo de cada día en el que la tensión de corte fue superior a la tensión crítica.

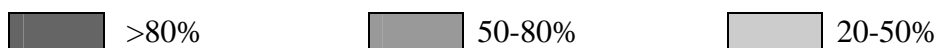
Como ya se ha mencionado anteriormente en otros apartados, del 12 al 17 de Marzo se produjo la mayor resuspensión de sedimentos, asociada mayoritariamente a la acción del oleaje. Las tensiones de corte asociadas a la corriente no superaron la tensión crítica durante esos días excepto en el punto de estudio A3, donde sí se registró resuspensión asociada.

Destaca también la semana del 20 al 26 de Marzo, en la que se produjeron resuspensiones causadas por el oleaje en los puntos de estudio más cercanos a la costa, es decir, A1, A2 y Badalona, siendo más intensas en esta última. A principios de semana también se detectan resuspensiones causadas por la corriente en el punto de estudio A3, mientras que en la estación A2 aparecen de forma leve.

Durante la tercera y cuarta semana no se produjeron apenas resuspensiones en los puntos de estudio. Solamente el día 6 de Abril en la estación Badalona se produjo una leve resuspensión asociada al oleaje.

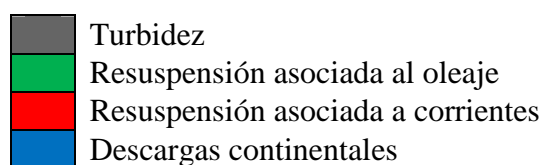
Finalmente, en la última semana se observa como en el punto de estudio Badalona se producen resuspensiones leves asociadas al oleaje a principio de semana, que van aumentando conforme esta va avanzando. El día 16 de Abril es el día en el que la tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje es superior a la crítica durante más tiempo. También se deben mencionar las resuspensiones producidas por la corriente en el punto de estudio A3 el día 15 de Abril.

A continuación, en la Tabla 10 se muestra la comparación de los días en los que se registró turbidez y los factores que pudieron influir para que se produjera este fenómeno, es decir, las resuspensiones asociadas al oleaje y/o corrientes y las descargas del río Besòs y aliviaderos.



	OLEAJE					CORRIENTES			
	A1	A2	A3	BAD	LLOB	A1	A2	A3	BAD
11/03									
12/03									
13/03									
14/03									
15/03									
16/03									
17/03									
18/03									
19/03									
20/03									
21/03									
22/03									
23/03									
24/03									
25/03									
26/03									
27/03									
28/03									
29/03									
30/03									
31/03									
01/04									
02/04									
03/04									
04/04									
05/04									
06/04									
07/04									
08/04									
09/04									
10/04									
11/04									
12/04									
13/04									
14/04									
15/04									
16/04									
17/04									
18/04									

Tabla 9. Resumen diario de las tensiones de corte superiores a las tensiones críticas.



	TURBIDÍMETRO				OBS			
	A1		A2		A1		A2	
11/03								
12/03								
13/03								
14/03								
15/03								
16/03								
17/03								
18/03								
19/03								
20/03								
21/03								
22/03								
23/03								
24/03								
25/03								
26/03								
27/03								
28/03								
29/03								
30/03								
31/03								
01/04								
02/04								
03/04								
04/04								
05/04								
06/04								
07/04								
08/04								
09/04								
10/04								
11/04								
12/04								
13/04								
14/04								
15/04								
16/04								
17/04								
18/04								

Tabla 10. Resumen diario de turbidez y factores que provocan resuspensión.

Observando la tabla Tabla 10 se puede apreciar como en la turbidez registrada durante la primera semana, concretamente del 12 al 17 de Marzo, participaron los tres factores que pueden producirla. Por un lado, observando los gráficos de apartados anteriores, se puede deducir que el principal factor que provocó la turbidez fue la acción del oleaje, pero también tuvieron lugar corrientes fuertes, aumentando la acción combinada de ambos fenómenos. Adicionalmente, se produjeron descargas continentales significativas que ayudaron a alcanzar tales picos de concentración de sedimentos en suspensión.

Durante la segunda semana, aunque existió resuspensión teórica asociada al oleaje y algunos días de resuspensión producida por la corriente, los instrumentos no registraron incrementos en la turbidez del agua. Este hecho puede ser debido a que las tensiones de corte críticas calculadas, al ser estimadas, fueran realmente más altas.

A mediados de la cuarta semana, concretamente los días 6 y 7 de Abril, se observa resuspensión asociada al oleaje con el consecuente aumento de la turbidez.

Ya en la última semana de campaña, se observa como durante los días 10 y 12 de Abril los instrumentos detectaron incrementos en la concentración de partículas en suspensión. La turbidez correspondiente al día 12 se podría asociar a la resuspensión generada al oleaje del día 11. Sin embargo, no queda muy claro el origen de la turbidez registrada el día 10.

Durante los últimos días se produjeron de nuevo resuspensiones teóricas producidas principalmente por el oleaje, aunque también por las corrientes en menor medida. Sin embargo, los instrumentos no detectaron incrementos en la turbidez, lo que indica de nuevo que quizá las tensiones de corte críticas hayan sido subestimadas.

7. DISCUSIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es poner en común toda la información que se ha recabado hasta el momento, describiendo los procesos hidrodinámicos que tuvieron lugar durante la campaña y su correlación con las concentraciones de sedimentos en suspensión medidas.

Para ello, se va a dividir la campaña en cuatro períodos, correspondiéndose aproximadamente a períodos semanales, excepto el tercer período, que comprende dos semanas. Esta elección se ha realizado por la coincidencia de dichos períodos con episodios de mayor o menor energía hidrodinámica, dando lugar a diferentes escenarios.

El primer período comprende del 12 de Marzo, un día después de comenzar la recogida de datos, al 20 de Marzo. Durante estos primeros días de campaña se produjeron eventos de tormenta con precipitaciones, con la consiguiente agitación hidrodinámica y el aumento significativo de las concentraciones de sedimentos en suspensión.

Durante el segundo período, del 20 al 28 de Marzo, las acciones hidrodinámicas disminuyeron su energía pero sin llegar al nivel de calma que se registró durante el tercer período, el cual se sitúa entre los días 28 de Marzo y 9 de Abril.

Ya en el último período, del 9 de Abril hasta el final de la campaña, el 18 del mismo mes, se observa un ligero aumento de la agitación costera que provoca a su vez leves aumentos en la turbidez del agua.

7.2. ESCENARIOS

A continuación, se explican los acontecimientos que tuvieron lugar durante cada uno de los cuatro períodos mencionados.

Para ello, se va a proceder a exponer las series más representativas correspondientes a las estaciones A1 y A2, ya que se dispone de datos de turbidez en esos mismos puntos de estudio y, habiendo realizado el análisis del capítulo 5, se puede considerar que, salvo mínimas diferencias, los valores medidos del resto de variables se corresponden en general con los medidos en el resto de puntos de estudio, simplificando así el análisis. También se representarán las descargas continentales medidas durante la campaña y las series de datos correspondientes a la velocidad media del viento de la estación Badalona, más cercana a estas dos estaciones.

Posteriormente, se mostrarán de nuevo los gráficos correspondientes a las tensiones de corte generadas en estos dos puntos de estudio y en la estación A3, junto con los valores de concentración de sedimento en suspensión registrados, añadiendo también una representación de los flujos de sedimento ($V_{corriente} \cdot C_{sedimento}$) que se produjeron paralelamente a la costa, es decir, en el eje SO-NE.

7.2.1. PERÍODO DEL 12 AL 20 DE MARZO

Como ya se ha avanzado anteriormente, este período se caracteriza principalmente por las condiciones meteorológicas adversas que se produjeron sobre todo durante los días 12 y 15 de Marzo.

En las Figs. 150 y 151 se puede observar como los caudales de descarga de los aliviaderos y, en especial, del río Besòs, experimentan un pequeño incremento durante el día 12, fruto de la corta pero intensa lluvia caída ese día en la región (ver Fig. 140 del apartado 5.5.1.). A ello, se deben sumar vientos intensos de Levante cuya velocidad media alcanzaba los 10 m/s durante ese mismo día, provocando una elevación de las alturas significantes de ola registradas, que llegaron a los 2.5-3 metros. Como consecuencia, se produjo un aumento de las tensiones de corte sobre el fondo asociadas al oleaje, sobrepasando con holgura la tensión crítica y produciendo una gran resuspensión de sedimentos. Todo ello, tanto las descargas continentales producidas como sobre todo el oleaje energético, produjo un aumento en la turbidez del agua, que fue registrado por los instrumentos. También la corriente experimentó durante ese día un ligero aumento de su velocidad en el fondo en dirección SO, llegando a los 20 cm/s, aunque sin llegar a producir resuspensión en los puntos de estudio A1 y A2. Sin embargo, en la estación A3 las tensiones de corte asociadas a la corriente sí superaron la tensión crítica, poniendo en movimiento las partículas del fondo. Producto de todo lo mencionado anteriormente, durante ese día se produjeron flujos de sedimento hacia el SO de alrededor de 200-300 gr/m²s.

Durante los días 13 y 14, tanto la disminución de la velocidad del viento como las leves precipitaciones provocaron un descenso en la intensidad de las acciones hidrodinámicas, disminuyendo también los caudales de descarga. Prueba de ello es la disminución en la turbidez del agua y, por tanto, en la concentración de sedimentos en suspensión. Sin embargo, se observa como en el punto de estudio A3 se vuelve a producir resuspensión asociada a la corriente. Llama la atención el pico asociado a la concentración de sedimentos en suspensión de la estación A2 a finales del día 14 ya que, observando el resto de series, no parece tener mucho sentido y posiblemente sea fruto de algún fallo del instrumento o algún animal u objeto que permanecería delante de él.

El día 15 el viento de Levante volvió a soplar con fuerza y se produjo, por tanto, un nuevo aumento en las alturas de ola. Además, los caudales de descarga experimentaron ese día un extraordinario aumento, fruto de las intensas lluvias caídas no tanto en litoral de Barcelona, sino previsiblemente en el interior, alcanzándose los 160 m³/s en el río Besòs. Todo ello produjo de nuevo un aumento en la turbidez del agua y unos flujos de sedimento en suspensión hacia el SO del orden de 400-500 gr/m²s. Durante este episodio no se produjeron resuspensiones asociadas a la corriente.

Durante los días restantes, hasta el 20 de Marzo, las condiciones meteorológicas mejoraron y la turbidez del agua fue recuperando sus valores normales. Este período de calma se refleja, por ejemplo, en los flujos de corriente, que se empezaron a desplazar levemente hacia el NE en lugar de hacia el SO, como es habitual.

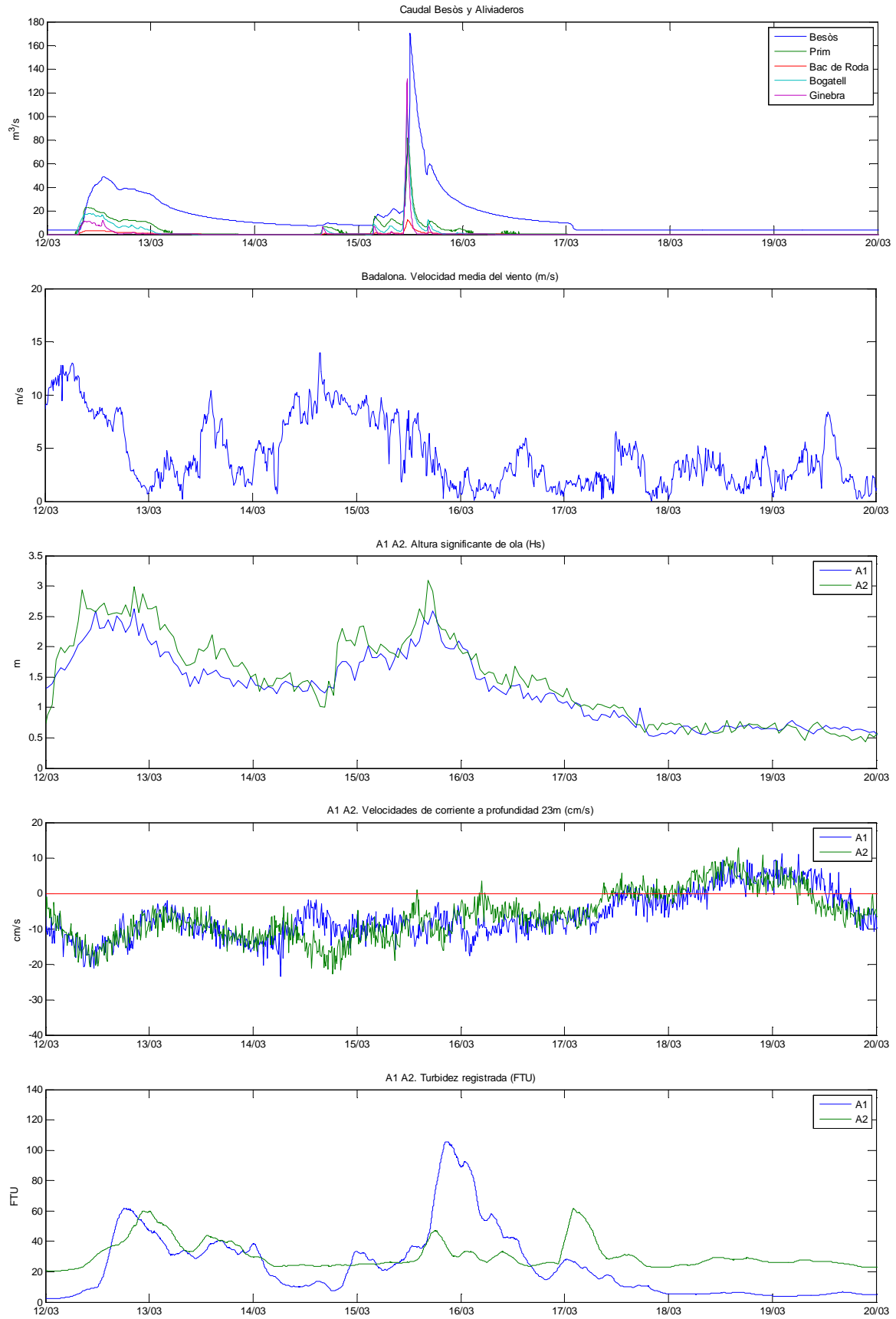


Fig. 150. Series más representativas para el período del 11 al 20 de Marzo (Parte 1).

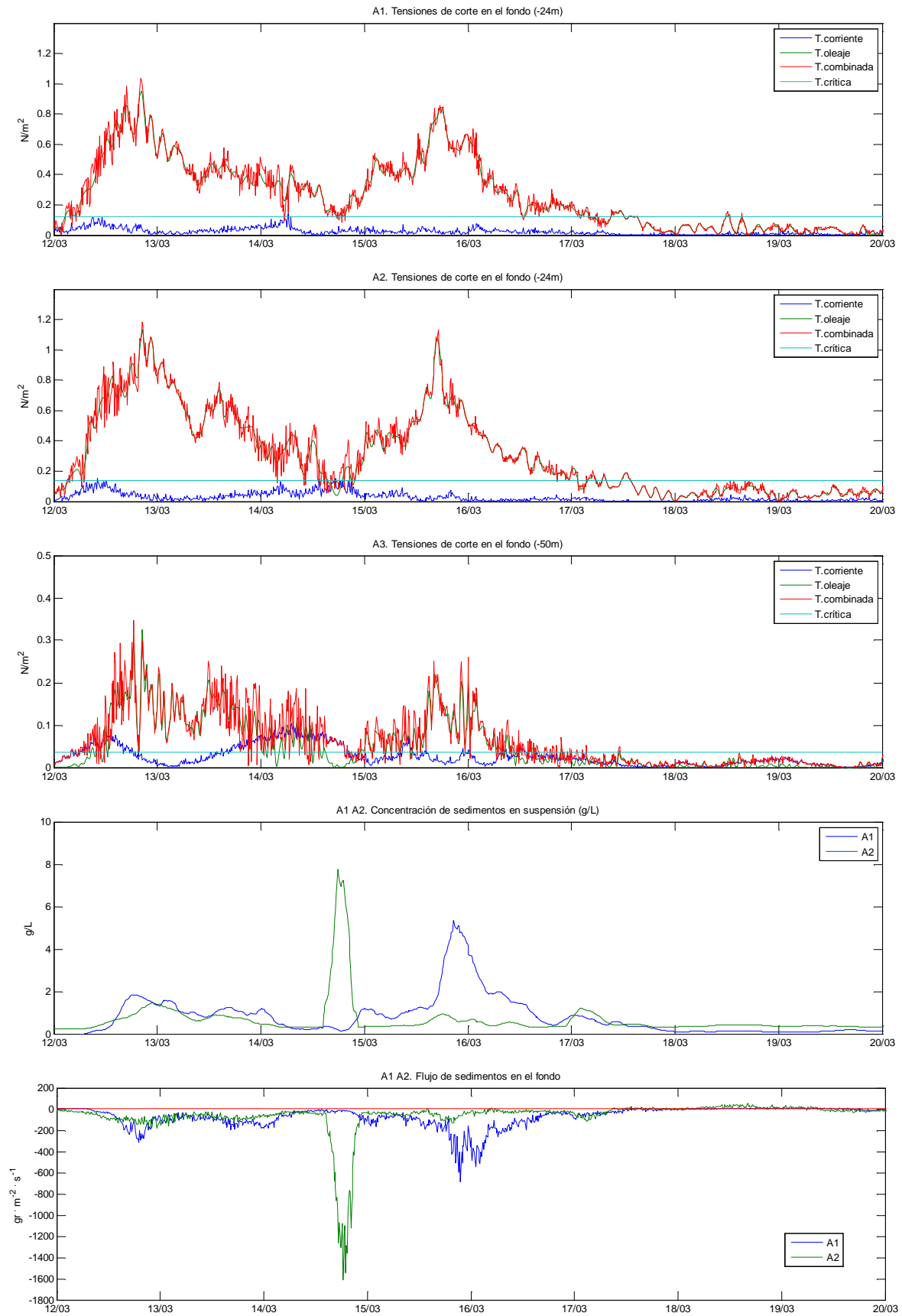


Fig. 151. Series más representativas para el período del 11 al 20 de Marzo (Parte 2).

7.2.2. PERÍODO DEL 20 AL 28 DE MARZO

Como se puede apreciar en las Figs. 152 y 153, este es un período de relativa calma y valores bajos de turbidez. Sin embargo, existe aún un oleaje con cierta energía, provocado por vientos de alta intensidad que siguen soplando de Levante. Se puede observar también la ausencia de precipitaciones durante todo el período a través de la representación de los caudales de descarga.

El día 20 de Marzo se observa un importante aumento en los registros de altura significativa de ola de los 0.5 a los 1.5 metros debido al aumento en la intensidad del viento procedente del Este, que alcanza los 8 m/s. Como consecuencia, el aumento de las tensiones de corte asociadas al oleaje provocan pequeñas resuspensiones de sedimento durante este día y el siguiente. Además, producto de esta pequeña inestabilidad, la corriente adquiere un desplazamiento en dirección SO con velocidades altas, llegando a los 20-30 cm/s. Esto provoca un flujo de sedimentos en dirección SO que sobrepasa los 50 gr/m²s.

Tras una cierta disminución durante finales del día 21, la intensidad del viento vuelve a cobrar fuerza durante los días 22 y 23, sobrepasando los 10 cm/s y volviendo a provocar oleaje de hasta 1.5 metros de altura.

A partir de entonces, y hasta aproximadamente el día 27 de Marzo, la altura significativa de ola se mantiene por encima del metro de altura, causando en algunas ocasiones leves resuspensiones de sedimento. Estas partículas, ayudadas por una corriente que adquiere velocidades altas durante los días 25 y 26, se desplazan hacia el SO en flujos que superan los 100 gr/m²s.

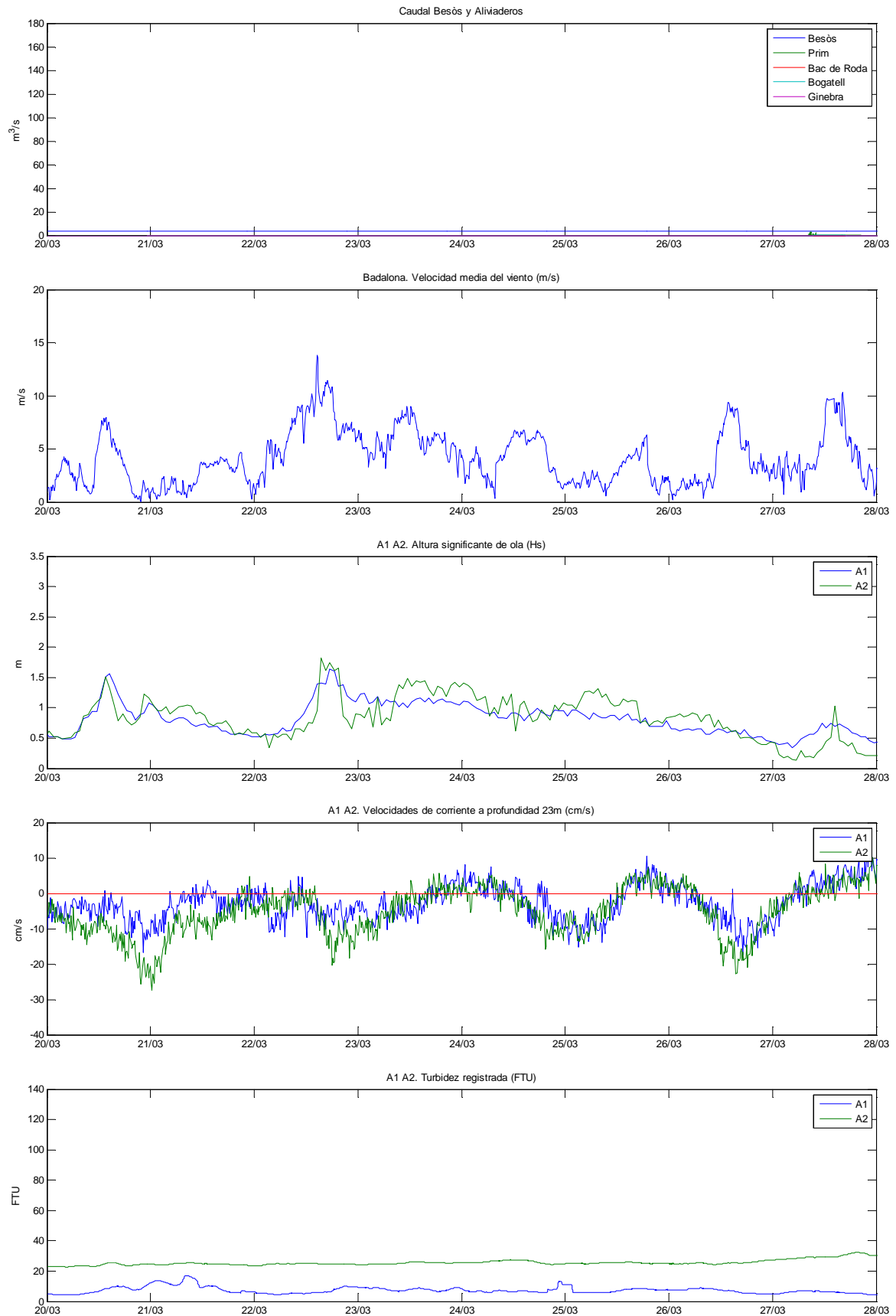


Fig. 152. Series más representativas para el período del 20 al 28 de Marzo (Parte 1).

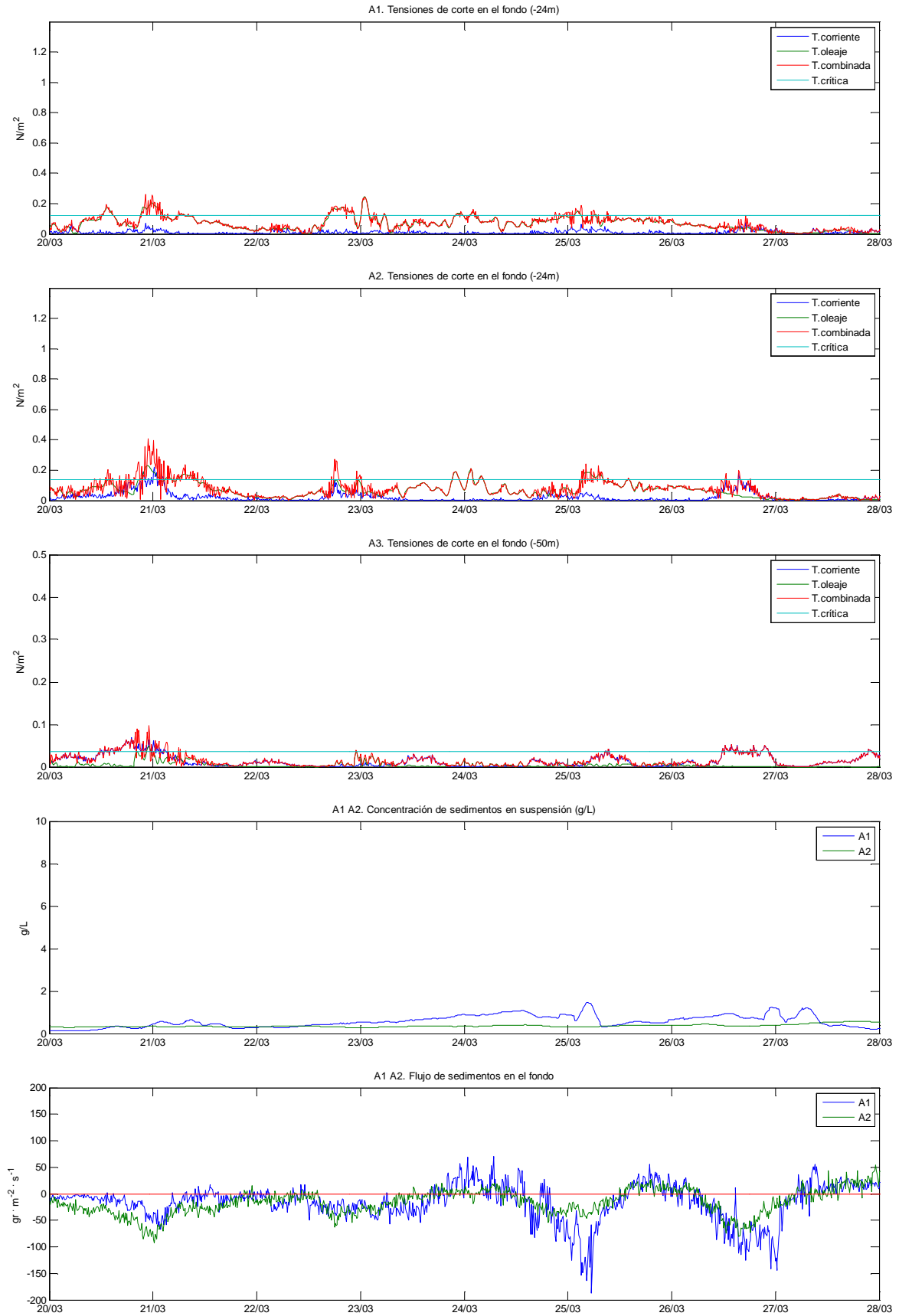


Fig. 153. Series más representativas para el período del 20 al 28 de Marzo (Parte 2).

7.2.3. PERÍODO DEL 28 DE MARZO AL 9 DE ABRIL

Tras los períodos de tormentas y de transición, se puede observar en las Figs. 154 y 155 como durante las casi 2 semanas siguientes apenas existen acontecimientos significativos y remarcables, ya que el mar se encuentra en un estado de calma absoluta. Prueba de ello son las bajas alturas significantes de ola que se registran en este período, casi siempre por debajo de los 0.5 metros. El viento que sopla, en este caso, proviene mayoritariamente del NO (Mistral), y cuando lo hace con más fuerza sopla desde el SSO (Garbí-Migjorn).

No se registran, por tanto, resuspensiones de ningún tipo durante este período. Sin embargo, hay que tener en cuenta las pequeñas resuspensiones teóricas que se producen en las cercanías de la costa, como ocurre en la estación Badalona, ya que con alturas de ola relativamente no muy altas se pueden llegar a generar tensiones de corte superiores a las tensiones críticas.

El caudal del río Besòs sigue descargando al mar un caudal de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, que sería la única explicación a la leve subida permanente que experimenta la turbidez del agua en el punto de estudio A2, situado en las proximidades de la desembocadura del río.

Aunque no exista resuspensión alguna, sí existen flujos de sedimento en determinadas fechas. El día 2 de Abril, por ejemplo, se experimenta una subida en la concentración de sedimentos en suspensión en el punto de estudio A1. Esta subida no tiene explicación alguna, por lo que se podría obviar, pero en caso de ser real provocaría un flujo de sedimento en dirección NE de alrededor $100 \text{ gr/m}^2\text{s}$. Sin embargo, el flujo de partículas en suspensión que tiene lugar el 8 de Abril sí responde a un aumento de velocidad de la corriente en dirección SO en el punto de estudio A2, alcanzando los 20 cm/s y transportando estas partículas en un flujo que sobrepasa los $100 \text{ gr/m}^2\text{s}$.

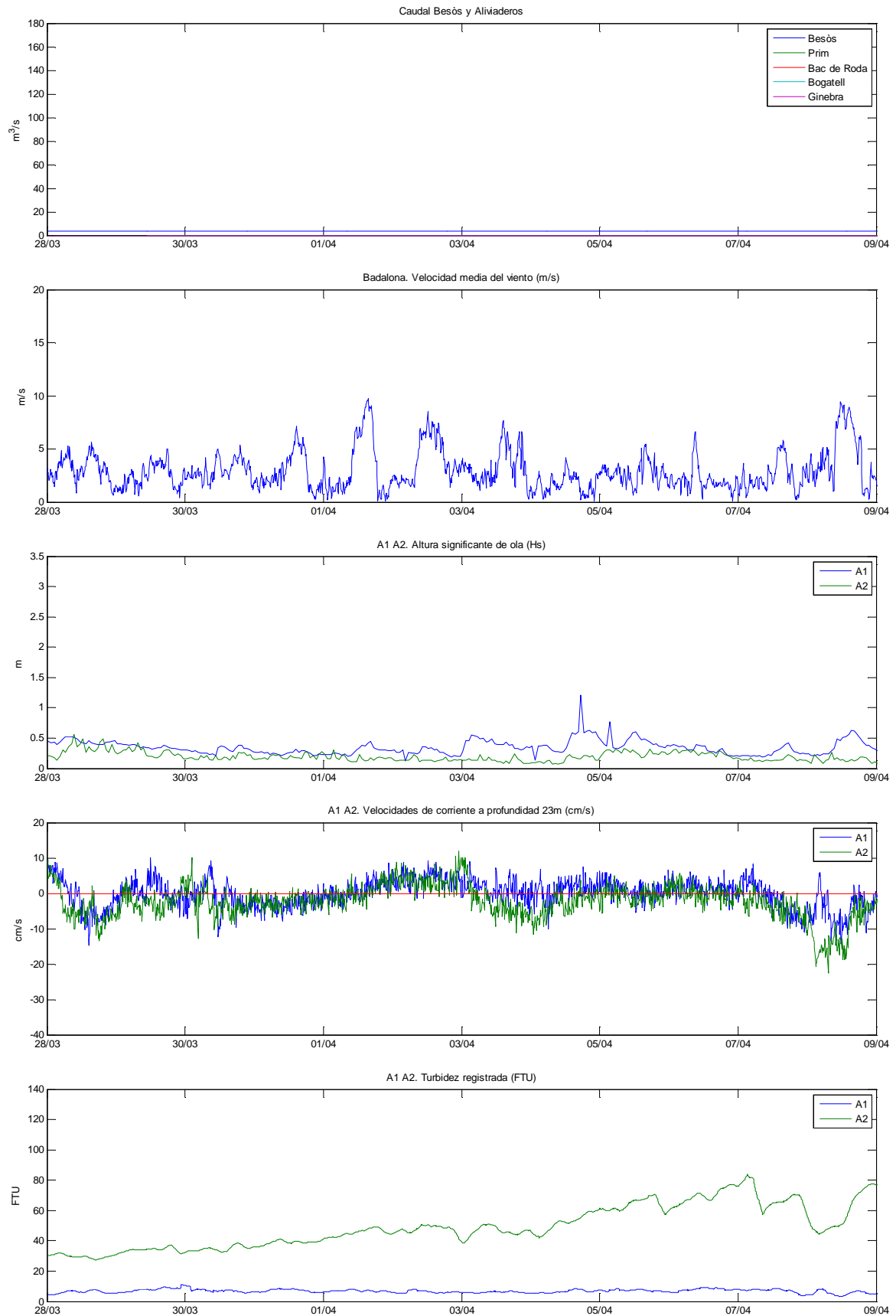


Fig. 154. Series más representativas para el período del 28 de Marzo al 9 de Abril (Parte 1).

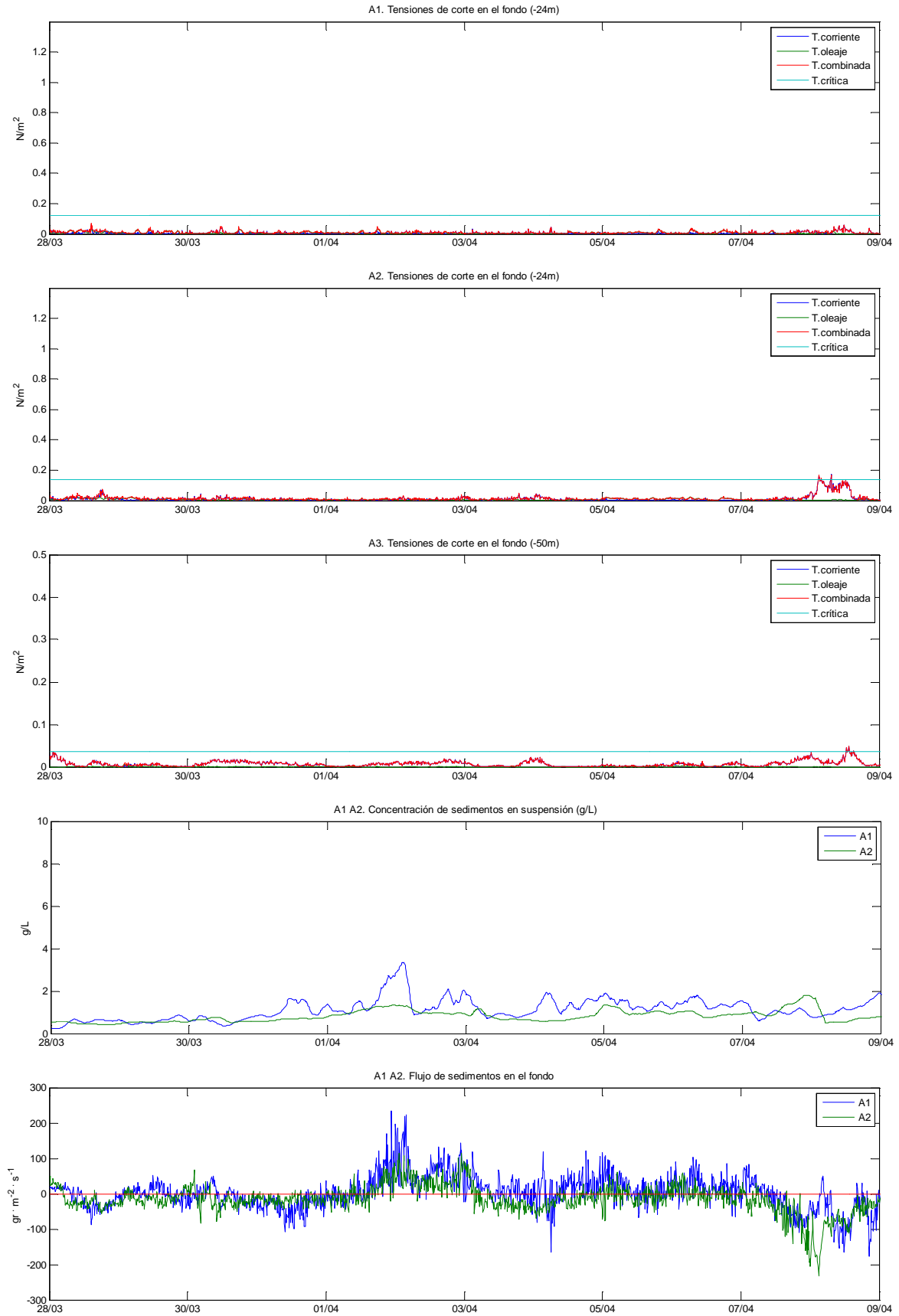


Fig. 155. Series más representativas para el período del 28 de Marzo 9 de Abril (Parte 2).

7.2.4. PERÍODO DEL 9 AL 18 DE ABRIL

Siguiendo una dinámica parecida al período anterior, el mar se encuentra en relativa calma ya que, como se puede observar en las Figs. 156 y 157, la altura significativa de ola supera ya durante la mayoría del período los 0.5 metros. Sin embargo, este oleaje tampoco es suficientemente fuerte como para generar resuspensiones de sedimento, exceptuando algunos casos muy puntuales.

De todos modos, hay que seguir teniendo en cuenta las resuspensiones próximas a la costa ya que, como se puede apreciar, se experimentan algunos incrementos en la turbidez registrada por los instrumentos. También es cierto que este es el período en el que los instrumentos ya están cubiertos de suciedad, fenómeno que puede inducir a errores en la interpretación. Es lo que sucede con la representación de los flujos de sedimento ya que, los altos valores de turbidez que se registran provocan también altos valores de flujo de sedimento.

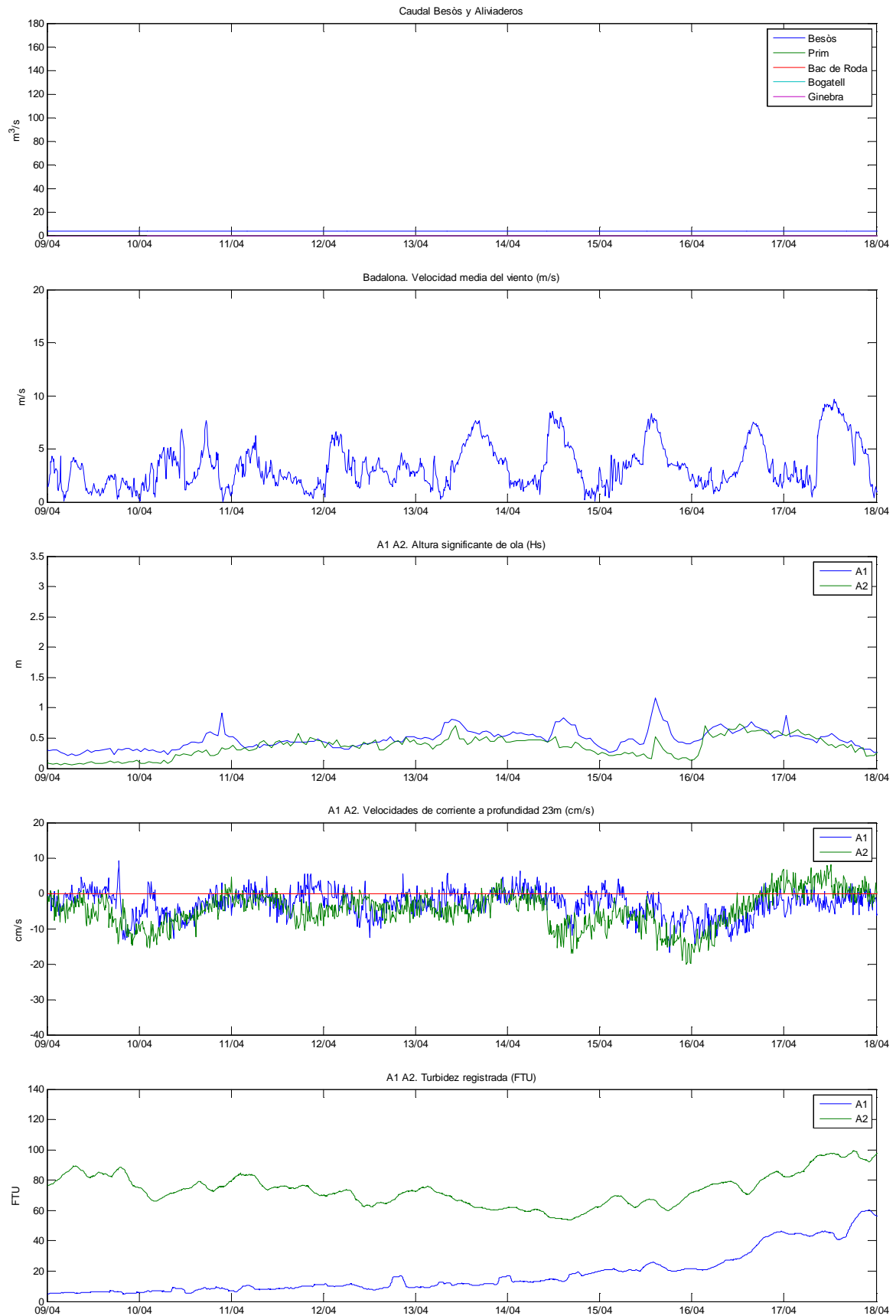


Fig. 156. Series más representativas para el período del 9 al 18 de Abril (Parte 1).

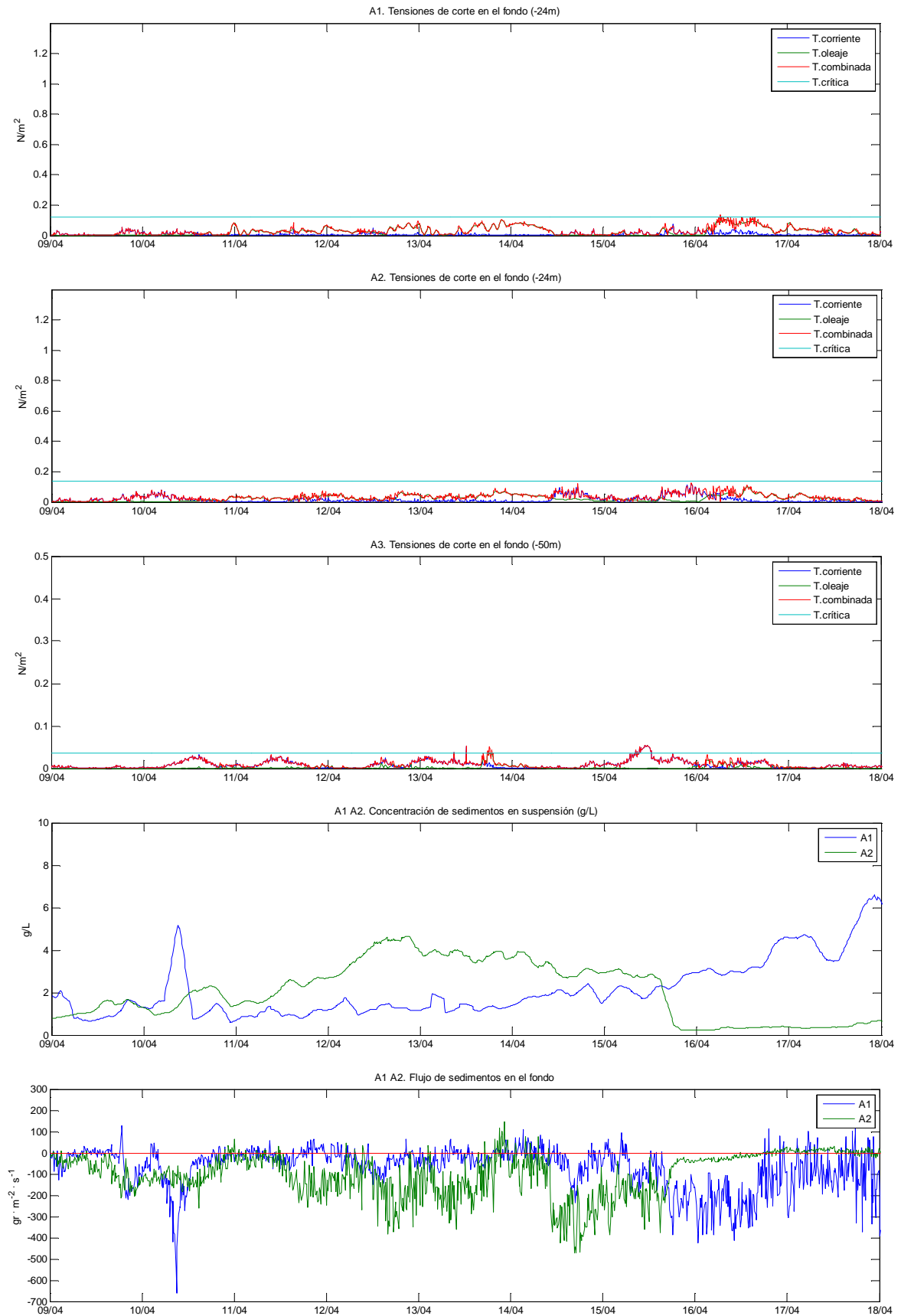


Fig. 157. Series más representativas para el período del 9 al 18 de Abril (Parte 2).

8. CONCLUSIONES

El hecho de que durante el principio de la campaña se registraran los datos correspondientes a eventos de tormenta, ha servido para caracterizar mejor los fenómenos relacionados con el movimiento de partículas en el fondo marino. Se han podido observar oleajes muy energéticos que ejercían elevadas tensiones de corte sobre el fondo, provocando grandes resuspensiones de sedimento. Este oleaje de tormenta viene generalmente provocado por vientos fuertes de Levante (Este), que popularmente se conocen como *llevantades*, y que pueden venir acompañados de chubascos tormentosos. En ese caso, las descargas continentales del río Besòs y de los aliviaderos también juegan un papel muy importante a la hora de señalar las causas de una alta concentración de sedimentos en suspensión en el litoral.

Existe una corriente litoral en dirección SO que se intensifica bajo la acción del viento de Levante en las capas más superficiales. Sin embargo, es en las capas intermedias donde esta corriente adquiere su homogeneidad en cuanto a dirección, copando en algunos puntos hasta más del 60% del tiempo la dirección SO, como sucede por ejemplo en la estación Llobregat. Esta corriente es la responsable principal del transporte de sedimentos en la zona, ya que en los eventos de resuspensión, o tras una descarga continental intensa, es capaz de movilizar grandes cantidades de partículas en dirección SO, siguiendo la orientación de la línea de costa.

No obstante, también existe una corriente secundaria en dirección opuesta, que apunta al NE. Esta sólo se presenta en períodos de calma y bajas presiones hidrodinámicas, siendo capaz también de transportar sedimentos en dirección NE, aunque en una menor proporción debido a su baja intensidad y baja frecuencia de aparición.

Por todo lo expuesto anteriormente, se puede confirmar que la resuspensión de sedimentos en el litoral de Barcelona está dominada principalmente por la acción del oleaje, sobre todo en las zonas más cercanas a la costa. Sin embargo, en zonas más profundas, al oleaje le cuesta más incidir sobre el lecho marino, y es en esos puntos donde una corriente intensa puede originar la resuspensión, debido también al menor tamaño de las partículas y, por lo tanto, de su menor tensión de corte crítica.

Otra de las conclusiones es que en períodos de calma no se producen resuspensiones, exceptuando las áreas más próximas a la zona de rompientes. Durante estos períodos el oleaje sigue direcciones muy dispares, mientras que las corrientes también se suelen orientar hacia las direcciones menos habituales.

Como último apunte, resaltar el carácter cualitativo de este estudio, ya que en algunas representaciones, sobre todo las correspondientes a los OBS y, en consecuencia, en las de flujo de sedimento, se muestran valores que están muy por encima de lo normal, por lo que deberían obviarse y centrar sólo la atención en las correlaciones encontradas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ACA, 2012. *El litoral de Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. 5pp.
- Armengou, C., 2011. *Experimental study of sediment fluxes on Barcelona's nearshore*. Tesina de especialidad. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya. 169pp.
- Bijker, E. W., 1971. *Longshore transport computations*. J. Waterway. Harbour. Coast. Eng. Div.-ASCE, 97 (WW4), pp.687-701.
- Bolaños, R., 2004. *Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y predicción*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 231pp.
- Brenner, J., Jimenez, J. A., Sardá, R., 2006. *Definition of homogeneous environmental management units for the Catalan coast*. Environ Manage, Vol. 38, pp.993-1005.
- Canals, M., Liqueste, C., Lastras, G., Amblas, D., Urgeles, R., De Mol, B., De Batist, M., Hughes-Clarke, J. E., 2007. *Long-term development and current status of the Barcelona continental shelf: A source-to-sink approach*. Continental Shelf Research, Vol. 27, pp.1779-1800.
- Davis, R. A. y Hayes, M. O., 1984. *What is a wave-dominated coast?*. Marine Geology, v.60, pp.313-329.
- Díaz, A., 2010. *Análisis de los criterios sea y swell en el Mediterráneo Noroccidental*. Tesina de especialidad. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya. 137pp.
- Font, J., La Violette, P. E., Tintoré, J., 1990. *The surface circulation of the Balearic sea*. Journal of Geophysical Research, Vol. 95, pp.1559-1568.
- Foreman, M. G. G., 1977. *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science, Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C., Canada, 101pp.
- Fredsoe, J., 1981. *Mean current velocity distribution in combined waves and current*. Progress report No. 53, ISVA, Technical University of Denmark.
- Gómez, C., Túnich, J., 1996. *El nuevo emisario submarino de la planta depuradora del Besós*. Ingeniería del agua Vol. 3, nº 3, pp.55-70.
- ITGE, 1988. *Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes 1:200.000*. Hoja 35/42A (Barcelona). Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid. Servicio de publicaciones del Ministerio de Industria.

- Just, R., 2012. *Estudio experimental de las plumas producidas por descargas costeras en el litoral de Barcelona*. Tesina de especialidad. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya. 189pp.
- Madsen, O. S., Grant, W. D., 1979. *Combined wave and current interaction with a rough bottom*. Journal of Geophysical Research, 84(C4), pp.1797-1808.
- Madsen, O. S., Grant, W. D., 1982. *Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow*. Journal of Geophysical Research, 87, pp.469-481.
- Palanqués, A., 1993. *Distribution and heavy metal pollution of the suspended particulate matter on the Barcelona continental shelf (North-Western Mediterranean)*. Environmental Pollution, Vol. 85, pp.205-215.
- Pedersen, T., Lohrmann, A., 2004. *Possibilities and Limitations of acoustic surface tracking*. Oceans '04. MTTS/IEEE Techno-Ocean '04, Vol. 3, pp.1428-1434.
- Rubio, A., 2006. *Remolinos de mesoescala en el Mediterráneo Noroccidental: Generación y evolución. Capítulo I: Hidrodinámica en el Mediterráneo Noroccidental*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Shields, A., 1936. *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau 26: 5–24.
- Soulsby, R. L., 1983. *The bottom boundary layer of shelf seas*. Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas, Ed. B Johns, pp.189-266, Elsevier, Amsterdam, ISBN 0-444-42153-X.
- Soulsby, R. L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R. R., Thomas, G.P., 1993. *Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer*. Coastal Engineering, Vol. 21, pp.41-69.
- Soulsby, R. L., 1997. *Dynamics of Marine Sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford, London, ISBN 0-7277-2584-X.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. *A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation*. Journal of Marine Systems, 51, pp.123-145.
- XIOM. Gómez, J., Espino, M., Puigdefabregas, J., Jerez, F., Cateura, J., López, J., 2009. *Xarxa d'instrumentació oceanogràfica i meteorològica de la Generalitat de Catalunya. Boies d'onatge. Dades obtingudes l'any 2009*. Barcelona. Laboratori d'Enginyeria Marítima. Universitat Politècnica de Catalunya (2009)

WEBLIOGRAFÍA

aca-web.gencat.cat [última consulta: Mayo 2013].

www.aquatecgroup.com [última consulta: Mayo 2013].

www.besos.cat [última consulta: Mayo 2013].

www.campbellsci.co.uk [última consulta: Mayo 2013].

www.d-a-instruments.com [última consulta: Mayo 2013].

www.datawell.nl [última consulta: Mayo 2013].

www.meteocat.cat [última consulta: Julio 2013].

www.nortek-es.com [última consulta: Mayo 2013].

www.pontdepetroli.org [última consulta: Julio 2013].

www.puertos.es [última consulta: Junio 2013].

www.rae.es [última consulta: Octubre 2013].

www.rdinstruments.com [última consulta: Abril 2013].

www.sidmar.es [última consulta: Mayo 2013].

www.terrasond.com [última consulta: Abril 2013].

www.wordreference.com [última consulta: Octubre 2013].

www.xiom.cat [última consulta: Febrero 2013].